



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PENGURANGAN INSIDEN ENERGI *ARC FLASH* DENGAN  
MENGUNAKAN METODE *ZONE SELECTIVE*  
*INTERLOCKING* PADA PT. CONOCOPHILLIPS  
INDONESIA INC. LTD**

**Muhammad Fadli Mulia  
NRP 2213 106 055**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Ir. Teguh Yuwono**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TE 141599

**ARC FLASH INCIDENT ENERGY REDUCTION  
USING *ZONE SELECTIVE INTERLOCKING*  
AT PT. CONOCOPHILLIPS INDONESIA INC. LTD**

**Muhammad Fadli Mulia  
NRP 2213 106 055**

**Advisor  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Ir. Teguh Yuwono**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016**

**PENGURANGAN INSIDEN ENERGI ARC FLASH DENGAN  
MENGUNAKAN METODE ZONE SELECTIVE  
INTERLOCKING PADA PT. CONOCOPHILIPS INDONESIA  
INC. LTD**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**  
**NIP. 196603181990101001**

**Ir. Teguh Yuwono**  
**NIP. 195008061976121002**

**SURABAYA**  
**Januari, 2016**

**JURUSAN  
TEKNIK ELEKTRO**

# **PENGURANGAN INSIDEN ENERGI *ARC FLASH* DENGAN MENGGUNAKAN METODE *ZONE SELECTIVE INTERLOCKING* PADA PT. CONOCOPHILIPS INDONESIA INC. LTD**

Nama : Muhammad Fadli Mulia  
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Pembimbing II : Ir. Teguh Yuwono

## **ABSTRAK**

Sistem *Electric Submersible Pump* (ESP) memiliki arus hubung singkat yang khas jika dibandingkan sistem pada fasilitas lain. Hal ini dikarenakan, pada sistem ESP menggunakan kabel yang panjang untuk menyalurkan daya dari bagian permukaan ke bagian dasar sumur. Panjang kabel sistem ESP menyebabkan arus hubung singkat dan *Arc Flash* bagian dasar sumur dengan bagian permukaan memiliki beda yang cukup besar yaitu pada lajur tipikal 3 sebesar 78.70%. Besar insiden *Arc Flash* yang dilepaskan dapat merusak peralatan dan terutama dapat membahayakan pekerja yang bekerja di lingkungan tersebut. Perlu sistem pengaman yang mampu mengatasi gangguan tersebut. *Zone Selective Interlocking* sebagai sebuah metode yang bekerja berdasarkan komunikasi antar pengaman menjadi solusi yang sesuai dengan permasalahan tersebut. ZSI dapat mengurangi insiden energi *Arc Flash* tanpa mengorbankan selektifitas dari koordinasi pengaman sehingga kontinuitas daya tetap terjaga. Penerapan teknik ZSI ini akan coba diterapkan pada sistem tegangan rendah 0.48 kV PT. Conoco Phillips Indonesia Inc. Ltd. mengingat pentingnya perusahaan tersebut mengamankan peralatan serta pekerjaanya dari insiden *Arc Flash* yang besar.

**Kata Kunci :** *Arc Flash, Zone Selective Interlocking, Electric Submersible Pump*



# **ARC FLASH INCIDENT ENERGI REDUCTION USING ZONE SELECTIVE INTERLOCKING AT PT. CONOCOPHILLIPS INDONESIA INC. LTD.**

Name : Muhammad Fadli Mulia  
Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Advisor II : Ir. Teguh Yuwono

## **ABSTRACT**

*Sistem of Electric Submersible Pump (ESP) has a special characteristic for short circuit current compared to other industrial facilities. This is because, the ESP sistem uses a long cable to distribute power from the surface to the bottom of the well. The cable length of ESP sistem causes a short circuit current and Arc Flash in the bottom well and the surface have a big difference in the typical 3 is 78.70%. Incident energi released can damage equipment and endanger workers employed in these environments. We need a protection sistem that is able to cope with the disorder. Zone Selective Interlocking as a method based on the communication between protective device give solutions that fit the problem. ZSI can reduce Arc Flash incident energi without sacrificing selectivity of protection coordination so that the continuity of power is still safe. So we try apply this ZSI to the low voltage sistem 0,48 kV PT. Conocophillips Inc. Ltd. to give secure for workers and the equipment from high Arc Flash incident energi*

**Keywords :** Arc Flash, Arcing Current, Protection, Selective Coordination, Zone Selective Interlocking

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah Robbil 'Alamin*, puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia yang tak terhingga berupa kesabaran, ketegaran, dan kekuatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulisan Tugas Akhir ini salah satunya bertujuan untuk memenuhi syarat untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa dalam penyusunan Tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kepada Bapak, Mama tercinta, dan Adik-adik tersayang serta segenap keluarga lainnya yang tak putusnya memberikan semangat, mendoakan serta memberikan dukungan untuk keberhasilan ananda.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya.
3. Maya Topani Suzulia, Perempuan yang telah banyak berjasa dalam memberikan semangat, dukungan, serta doa kepada penulis.
4. Seluruh rekan Lintas Jalur-2013 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama 2 tahun ini. Terima kasih.
5. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, dan teman-teman lainnya yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan Tugas Akhir.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Desember 2016

Penulis

# DAFTAR ISI

|   | HALAMAN |
|---|---------|
| <b>HALAMAN JUDUL</b>  |         |
| <b>LEMBAR PERNYATAAN</b>  |         |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN</b>  |         |
| <b>ABSTRAK</b> .....  | i       |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | iii     |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....   | v       |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....   | vii     |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....  | ix      |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....   | xi      |
| <br><b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>  |         |
| 1.1 Latar Belakang Masalah .....  | 1       |
| 1.2 Permasalahan .....  | 1       |
| 1.3 Tujuan .....  | 2       |
| 1.4 Metodologi .....  | 2       |
| 1.5 Sistematika Penulisan .....   | 3       |
| 1.6 Manfaat .....   | 4       |
| <br><b>BAB 2 SISTEM KELISTRIKAN ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP (ESP) DAN METODE ZSI</b>    |         |
| 2.1 Peralatan Pada Sistem Tenaga Listrik .....  | 5       |
| 2.2 Definisi Arc Flash .....  | 7       |
| 2.3 Perhitungan Energi Arc Flash Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 [3] .....           | 9       |
| 2.4 Batas Jarak Perlindungan Arc Flash .....  | 12      |
| 2.5 Personal Protective Equipment .....   | 14      |
| 2.6 Gangguan Pada Sistem Kelistrikan .....  | 17      |
| 2.7 Definisi Zone Selective Interlocking (ZSI) .....                                    | 19      |
| <br><b>BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. CONOCOPHILLIPS INDONESIA INC. LTD. PLANT BELIDA</b> |         |
| 3.1 Sistem Kelistrikan Conocophillips Indonesia pada Plant Belida ...                   | 23      |
| 3.2 Data Kelistrikan Plant Belida .....   | 23      |
| 3.2.1 Sistem Pembangkitan .....   | 24      |
| 3.2.2 Sistem Distribusi .....   | 24      |



|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.2.3 Data Beban .....             | 25 |
| 3.3 Data Kelistrikan WHPB .....    | 26 |
| 3.3.1 Sistem Distribusi WHPB ..... | 26 |
| 3.3.1 Data Beban .....             | 28 |

## **BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA**

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan .....  | 29 |
| 4.2 Pengaturan Pengaman Arus Lebih .....  | 31 |
| 4.3 Simulasi Koordinasi Pengaman Kondisi Eksisting .....  | 31 |
| 4.3.1 Simulasi pada Tipikal 1 .....   | 32 |
| 4.3.2 Simulasi pada Tipikal 2 .....   | 35 |
| 4.3.3 Simulasi pada Tipikal 3 .....   | 38 |
| 4.3.3 Simulasi pada Tipikal 3 .....   | 41 |
| 4.4 Simulasi Koordinasi Pengaman dan <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> .....  | 44 |
| 4.4.1 Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> pada Tipikal 1 .....   | 44 |
| 4.4.2 Perhitungan Manual Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi<br><i>Resetting</i> Tipikal 1 .....                                    | 47 |
| 4.4.3 Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> pada Tipikal 2 .....   | 49 |
| 4.4.4 Perhitungan Manual Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi<br><i>Resetting</i> Tipikal 2 .....                                    | 52 |
| 4.4.1 Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> pada Tipikal 3 .....   | 53 |
| 4.4.2 Perhitungan Manual Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi<br><i>Resetting</i> Tipikal 3 .....                                    | 56 |
| 4.4.3 Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> pada Tipikal 4 .....   | 57 |
| 4.4.4 Perhitungan Manual Insiden Energi <i>Arc Flash</i> Kondisi<br><i>Resetting</i> Tipikal 4 .....                                    | 61 |
| 4.5 Simulasi Pengurangan Incident Energy <i>Arc Flash</i> dengan Teknik<br><i>Zone Selective Interlocking</i> .....                     | 63 |
| 4.5.1 Simulasi Pengurangan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> dengan<br>Teknik <i>Zone Selective Interlocking</i> pada Tipikal 1 - 4 ..... | 64 |
| 4.5.2 Perhitungan Manual Insiden Energi <i>Arc Flash</i> setelah<br>penerapan Teknik ZSI pada Tipikal 1 - 4 .....                       | 77 |
| 4.6 Perbandingan Insiden Energi <i>Arc Flash</i> <i>Resetting</i> dan ZSI .....   | 83 |



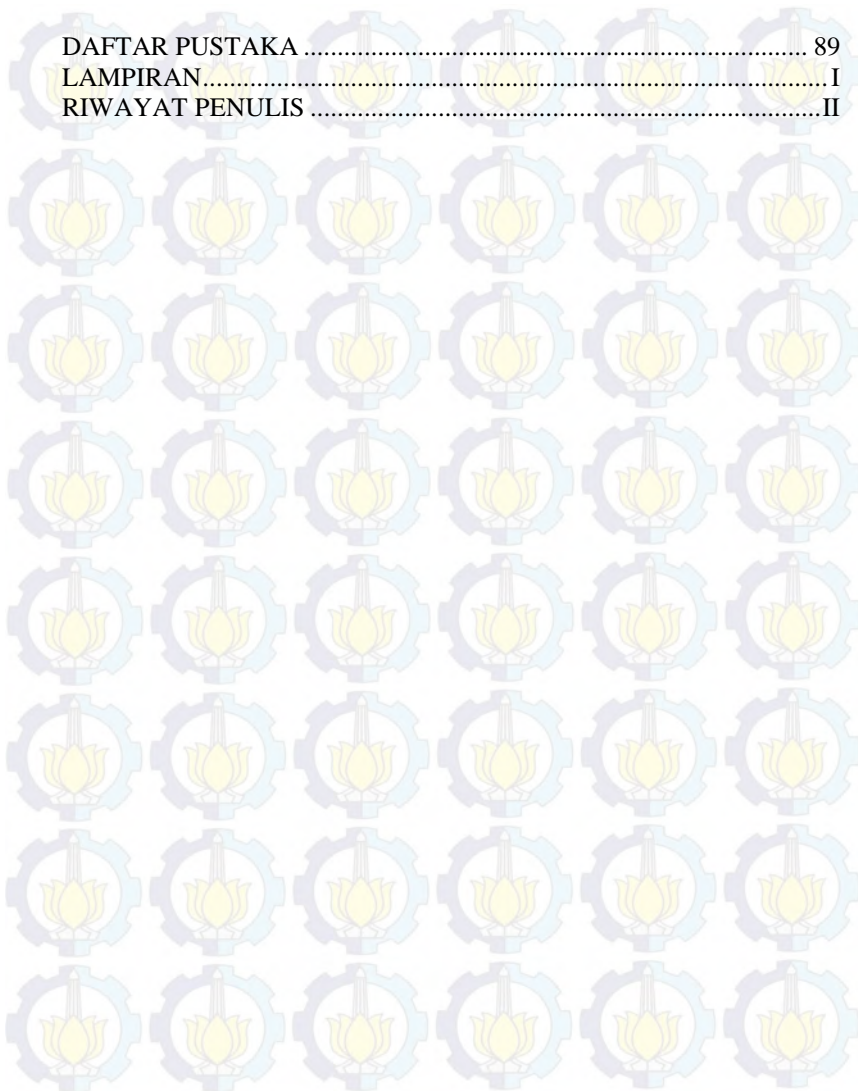
## **BAB 5 PENUTUP**

|                      |    |
|----------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan ..... | 87 |
| 5.2 Saran .....      | 88 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| DAFTAR PUSTAKA ..... | 89 |
|----------------------|----|

|               |   |
|---------------|---|
| LAMPIRAN..... | I |
|---------------|---|

|                       |    |
|-----------------------|----|
| RIWAYAT PENULIS ..... | II |
|-----------------------|----|



## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 2.1</b> Instalasi <i>Electrical Submersible Pump</i> ESP.....                       | 5  |
| <b>Gambar 2.2</b> Motor Induksi ESP .....   | 7  |
| <b>Gambar 2.3</b> Contoh <i>Arc Flash</i> .....   | 9  |
| <b>Gambar 2.4</b> Ilustrasi Batas Perlindungan Terhadap Bahaya <i>Arc Flash</i> .....         | 13 |
| <b>Gambar 2.5</b> Contoh Perlengkapan Keselamatan .....                                       | 14 |
| <b>Gambar 2.6</b> Ilustrasi Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori [2] ..... | 17 |
| <b>Gambar 2.7</b> Skema Metode ZSI .....  | 20 |
| <b>Gambar 2.8</b> Fitur ZSI di LVCB pada <i>Software Easy Power 9.7</i> .....                 | 22 |
| <b>Gambar 3.1</b> Model Sistem Kelistrikan WHPB .....   | 27 |
| <b>Gambar 4.2</b> Model Sistem Kelistrikan Tipikal 1 .....                                    | 32 |
| <b>Gambar 4.3</b> Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 1.....                              | 34 |
| <b>Gambar 4.4</b> Model Sistem Kelistrikan Tipikal 2.....                                     | 35 |
| <b>Gambar 4.5</b> Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 2.....                              | 37 |
| <b>Gambar 4.6</b> Model Sistem Kelistrikan Tipikal 3.....                                     | 38 |
| <b>Gambar 4.7</b> Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 3.....                              | 40 |
| <b>Gambar 4.6</b> Model Sistem Kelistrikan Tipikal 4.....                                     | 41 |
| <b>Gambar 4.9</b> Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 4.....                              | 43 |
| <b>Gambar 4.10</b> Kurva Kerja Peralatan <i>Resetting</i> Tipikal 1.....                      | 46 |
| <b>Gambar 4.11</b> Kurva Kerja Peralatan <i>Resetting</i> Tipikal 2.....                      | 51 |
| <b>Gambar 4.11</b> Kurva Kerja Peralatan <i>Resetting</i> Tipikal 3.....                      | 55 |
| <b>Gambar 4.13</b> Kurva Kerja Peralatan <i>Resetting</i> Tipikal 4.....                      | 60 |
| <b>Gambar 4.14</b> <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 1 – 4 pada <i>Easy Power</i> ....       | 64 |
| <b>Gambar 4.15</b> Fitur ZSI pada <i>Easy Power</i> .....                                     | 65 |
| <b>Gambar 4.16</b> Gangguan pada Kondisi 1 .....  | 65 |
| <b>Gambar 4.17</b> TCC pada <i>Easy Power</i> Saat Gangguan Kondisi 1 .....                   | 66 |
| <b>Gambar 4.18</b> Gangguan pada Kondisi 2.....   | 67 |
| <b>Gambar 4.19</b> TCC pada <i>Easy Power</i> Saat Gangguan Kondisi 2 .....                   | 68 |
| <b>Gambar 4.20</b> Gangguan pada Kondisi 3 .....  | 69 |
| <b>Gambar 4.21</b> TCC pada <i>Easy Power</i> Saat Gangguan Kondisi 3 .....                   | 70 |
| <b>Gambar 4.22</b> Gangguan pada Kondisi 4.....   | 71 |
| <b>Gambar 4.23</b> TCC pada <i>Easy Power</i> Saat Gangguan Kondisi 4 .....                   | 72 |
| <b>Gambar 4.24</b> Gangguan pada Kondisi 5 .....  | 73 |
| <b>Gambar 4.25</b> TCC pada <i>Easy Power</i> Saat Gangguan Kondisi 5 .....                   | 74 |
| <b>Gambar 4.26</b> Gangguan pada Kondisi 6.....   | 75 |
| <b>Gambar 4.27</b> TCC pada <i>Easy Power</i> Saat Gangguan Kondisi 6 .....                   | 76 |

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabel 2.1</b> Faktor Untuk Peralatan dan Kelas Tegangan .....   | 11 |
| <b>Tabel 2.2</b> <i>Typical Bus Gaps</i> .....   | 12 |
| <b>Tabel 2.3</b> <i>Typical Working Distance</i> .....   | 12 |
| <b>Tabel 2.4</b> Kategori <i>Personal Protective Equipment</i> [2] .....   | 15 |
| <b>Tabel 2.5</b> <i>Personal Protective Equipment</i> Untuk Kategori 1 [5].....                                      | 15 |
| <b>Tabel 2.6</b> <i>Personal Protective Equipment</i> Untuk Kategori 2 [5].....                                      | 15 |
| <b>Tabel 2.7</b> <i>Personal Protective Equipment</i> Untuk Kategori 3 dan 4 [5] .....                               | 16 |
| <b>Tabel 2.8</b> <i>Summary of Protective Clothing Categories (From Table</i><br>130.7(C) of NFPA 70E 2004) [6]..... | 16 |
| <b>Tabel 3.1</b> Data Pembangkit Utama <i>Plant</i> Belida.....  | 24 |
| <b>Tabel 3.2</b> Data Pembangkit Cadangan <i>Plant</i> Belida.....   | 24 |
| <b>Tabel 3.3</b> Data Bus <i>Plant</i> Belida .....  | 25 |
| <b>Tabel 3.4</b> Data Transformator <i>Plant</i> Belida .....  | 25 |
| <b>Tabel 3.5</b> Data Bus WHPB.....  | 26 |
| <b>Tabel 3.6</b> Data Transformator WHPB .....   | 26 |
| <b>Tabel 3.7</b> Data Kabel WHPB .....   | 26 |
| <b>Tabel 3.8</b> Data Beban WHPB.....  | 28 |
| <b>Tabel 4.1</b> Arus Hubung Singkat .....   | 31 |
| <b>Tabel 4.2</b> Setting Pengaman Eksisting Tipikal 1 .....  | 33 |
| <b>Tabel 4.3</b> Setting Pengaman Eksisting Tipikal 2 .....  | 36 |
| <b>Tabel 4.4</b> Setting Pengaman Eksisting Tipikal 3 .....  | 39 |
| <b>Tabel 4.5</b> Setting Pengaman Eksisting Tipikal 4.....   | 42 |
| <b>Tabel 4.6</b> Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 1 .....                            | 47 |
| <b>Tabel 4.7</b> Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 2 .....                            | 52 |
| <b>Tabel 4.8</b> Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 3 .....                            | 56 |
| <b>Tabel 4.9</b> Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 4 .....                            | 61 |
| <b>Tabel 4.10</b> Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> Tipikal 1 – 4 Teknik ZSI .....                                     | 77 |
| <b>Tabel 4.11</b> Hasil Perbandingan <i>Arc Flash</i> ZSI dengan <i>Resetting</i> .....                              | 83 |





# BAB 1

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang Masalah

Sistem *Electric Submersible Pump* (ESP) sering digunakan perusahaan minyak untuk memompa minyak dari dasar sumur ke permukaan. Penggerak utama sistem ESP adalah motor induksi yang terletak pada dasar sumur dengan kedalaman rata-rata lebih dari seribu meter dari permukaan tanah. Sumber listrik dan control peralatan yang terletak dipermukaan dihubungkan dengan kabel panjang yang dimasukkan kedalam dasar sumur minyak. Dengan panjangnya kabel pada bus dasar sumur dengan bus permukaan memiliki beda yang cukup besar. Oleh sebab itu, sistem ini memiliki karakteristik arus hubung singkat yang khas jika dibandingkan dengan sistem listrik yang lain.

Pemasangan sistem pengaman ESP pada permukaan harus benar-benar tepat dan memperhatikan ke-khas-an arus hubung singkat tersebut, sehingga sistem pengaman mampu mengamankan hubung singkat dibagian dasar sumur maupun permukaan. Selain itu, setting peralatan harus mampu mengamankan pekerja dengan memperhatikan bahaya arc flash yang terjadi jika ada gangguan pada bagian dasar sumur maupun pada bagian permukaan.

Melihat bahaya serta kerugian dari *Arc Flash* yang begitu besar, maka diperlukan suatu teknik atau metode untuk mengurangi energi insiden yang dilepaskan oleh *Arc Flash*. Sehingga dengan berkurangnya energi yang dilepas maka bahaya yang ditimbulkan pun berkurang. Salah satu teknik yang mampu mengurangi insiden energi dari *Arc Flash* pada tegangan rendah adalah *Zone Selective Interlocking*. Teknik ini mengacu pada prinsip semakin cepat arching fault dihilangkan maka semakin kecil incident energi yang dilepaskan. Dari penerapan teknik *Zone Selective Interlocking* ini pada PT. Conocophilips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida diharapkan insiden energi *Arc Flash* yang terjadi berkurang hingga mencapai kategori yang rendah dengan alat pelindung diri yang sesuai standar.

### Permasalahan

Permasalahan yang dibahas pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana koordinasi pengaman yang selektif dan efektif untuk mengurangi insiden energi *Arc Flash*

2. Seberapa besar insiden energi *Arc Flash* yang terjadi sebelum penerapan teknik ZSI pada tegangan rendah 0.48 kV
3. Bagaimana penerapan teknik Zone Selective Interlocking pada sistem agar dapat mengurangi insiden energi
4. Besar pengurangan insiden energi *Arc Flash*

### Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisis sistem kelistrikan PT. Conocophilips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida
2. Mengetahui seberapa besar insiden energi *Arc Flash* yang terjadi
3. Mengetahui penerapan metode ZSI pada sistem kelistrikan
4. Mengurangi insiden energi *Arc Flash* dengan metode ZSI

### Tujuan

Metode yang akan dilakukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data dan Studi Literatur  
Pengumpulan data ini dilakukan dengan melihat dan meniru data eksisting dari PT. Conocophilips Indonesia untuk plant Belida untuk kemudian dituangkan dalam Single Line Diagram. Selain mengumpulkan data peralatan juga dilakukan studi literatur mengenai standar-standar yang perlu diperhatikan dalam studi *Arc Flash*.
2. Pemodelan dan Simulasi  
Pemodelan pada sistem keistrikan ini dilakukan pada software ETAP 12.6 dalam bentuk single line diagram. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya, hubung singkat, koordinasi proteksi menggunakan *Star Device*. Kemudian dilakukan *resetting* koordinasi pengaman yang salah. Selanjutnya dilakukan studi *Arc Flash* untuk mengetahui besarnya insiden energi yang timbul saat gangguan pada sistem kelistrikan tersebut.
3. Analisis  
Hasil dari simulasi studi *Arc Flash* berupa besarnya insiden energi akan direduksi menggunakan *Zone Selective Interlocking* pada software *Easy Power* sehingga didapat nilai insiden energi yang mengalami pengurangan.

#### 4. Kesimpulan

Langkah akhir dalam penyusunan Tugas Akhir ini adalah pembuatan kesimpulan dan hasil pengurangan insiden energi pada sistem tegangan rendah dengan metode ZSI

#### **Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika sebagai berikut :

##### **BAB I : PENDAHULUAN**

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dari penulisan.

##### **BAB II : LANDASAN TEORI**

Bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini seperti konsep dasar dari *Zone Selective Interlocking* dan teori dari *Arc Flash* serta perhitungan insiden energinya yang berdasarkan standar IEEE 1584-2002

##### **BAB III : SISTEM KELISTRIKAN**

Dalam bab ini akan dibahas mengenai sistem kelistrikan PT. Conocophillips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida serta data-data kelistrikan yang mendukung studi *Arc Flash* ini.

##### **BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

Bab ini dibahas mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan. bab ini menyajikan hasil koordinasi pengaman yang selektif, analisis terhadap besarnya *incident energi*, dan besar pengurangan insiden energinya menggunakan *Zone Selective Interlocking* untuk kemudian diberikan kategori *personal safety outfit* bagi pekerja

##### **BAB V : PENUTUP**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi teknik ZSI untuk pengurangan insiden energi *Arc Flash*.



### **Manfaat**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi PT. Conocophillips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida dimana insiden energi yang bisa dikurangi serta pemilihan *safety outfit* yang sesuai dengan kategori
2. Dapat menjadi referensi bagi orang lain yang hendak mempelajari masalah serupa.



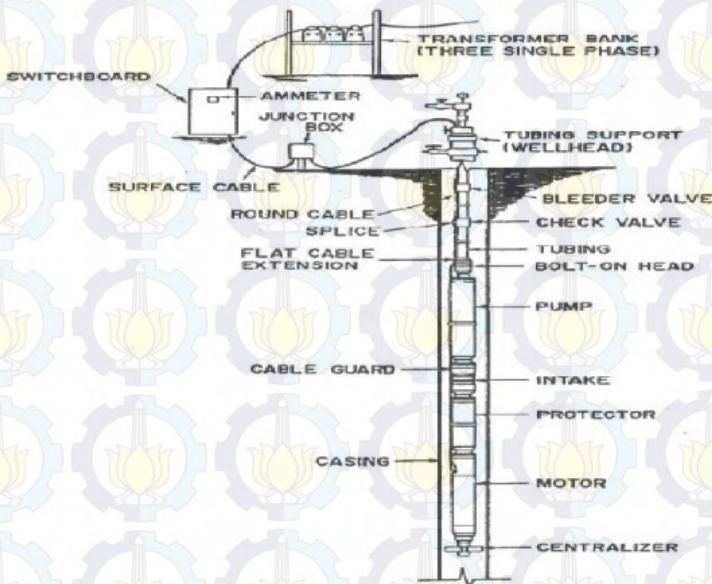
## BAB 2

### SISTEM KELISTRIKAN ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP (ESP) DAN METODE ZSI

#### 2.1 Peralatan Pada Sistem Tenaga Listrik

Peralatan listrik yang sering digunakan dalam pemompaan minyak dari dasar sumur ke permukaan adalah menggunakan *electrical submersible pump* (ESP).

*Electrical Submersible Pump* adalah pompa yang dimasukkan ke dalam sumur yang digunakan untuk memproduksi minyak secara artificial lift (pengangkatan buatan) dan digerakkan oleh motor listrik. Peralatan pompa listrik *submersible* terdiri dari pompa sentrifugal, *protector* dan motor listrik. Unit ini ditenggelamkan dicairan, disambung dengan tubing dan motornya dihubungkan dengan kabel ke permukaan yaitu switchboard dan transformator. Berikut gambar



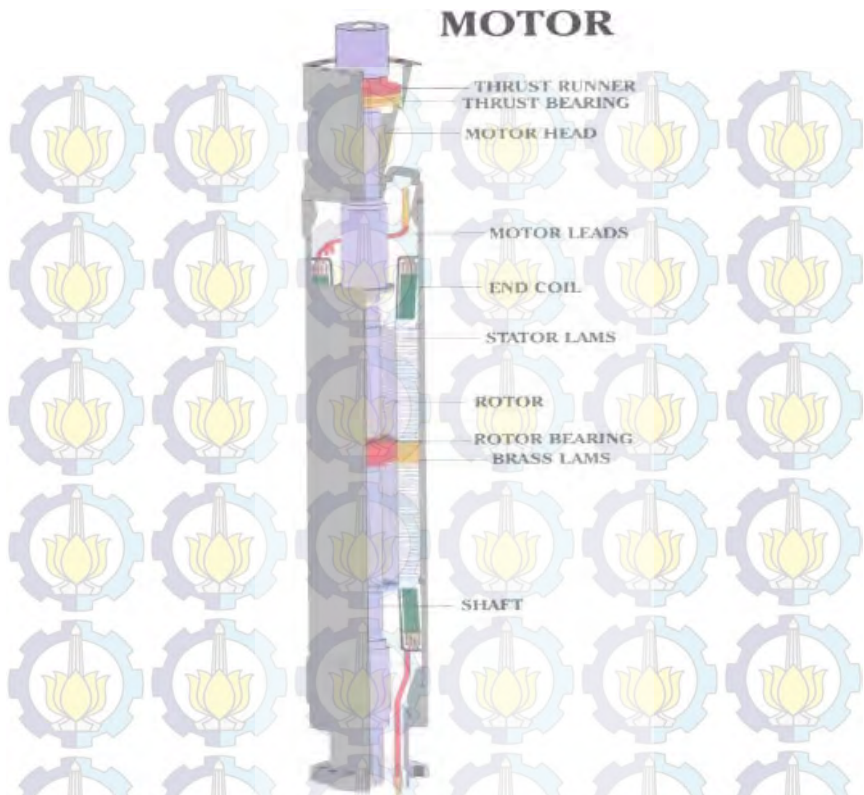
instalasi ESP.

**Gambar 2.1** Instalasi *Electrical Submersible Pump* ESP

Prinsip kerja *Electrical Submersible Pump* adalah berdasarkan pada prinsip kerja pompa sentrifugal dengan sumbu putarnya tegak lurus. Pompa sentrifugal dihubungkan langsung dengan motor penggerak menggunakan tenaga listrik dari *power plant*, dimana tenaga listrik untuk pompa di suplai dari switchboard dan transformator dipermukaan dengan perantara kabel listrik yang di-clamp pada tubing dengan jarak 15 hingga 20 ft. Motor hidrolik memutar cairan yang melalui impeller pompa, cairan masuk ke dalam impeller pompa menuju proses pompa, dikumpulkan oleh difusser kemudian akan dilempar keluar. Oleh impeller tenaga mekanis motor dirubah menjadi tenaga hidrolik. Impeller terdiri dari dua piringan yang didalamnya terdapat sudu-sudu, pada saat impeller diputar dengan kecepatan sudut  $\omega$ , cairan dalam impeller dilemparkan keluar dengan tenaga potensial dan kinetik tertentu. Cairan yang ditampung dalam rumah pompa kemudian di evaluasi melalui difusser, sebagian tenaga kinetik dirubah menjadi tenaga potensial berupa tekanan. Karena cairan dilempar keluar maka terjadi proses penghisapan.

Sistem ESP terdiri dari komponen yang berada dipermukaan (terpasang pada rumah fasilitas produksi) dan komponen yang berada didalam sumur minyak. Komponen yang berada dipermukaan biasanya terdiri dari alat kontrol motor (sering digunakan *variable speed controlled*), kabel permukaan dan transformer. Bagian dalam sumur biasanya terdiri dari pompa, motor, penutup dan kabel. *Gas separator* kadang kala terpasang.

Motor listrik pada jenis pompa reda adalah motor induksi sinkron dua kutub, tiga fasa yang diisi dengan minyak pelumas khusus yang mempunyai tahanan listrik (*dielectric strength*) tinggi, berbnetuk sangkar yang mempunyai kecepatan 3500 rpm pada 60 Hz dan 2915 rpm pada 50 Hz Berikut motor pompa reda yang digunakan.



Gambar 2.2 Motor induksi ESP

Secara garis besar motor ini mempunyai dua bagian pokok, yaitu Rotor (gulungan kabel halus yang berputar) dan Stator (gulungan kabel halus yang stasioner dan menempel pada beban motor)

## 2.2 Definisi Arc Flash

*Arc Flash* merupakan dampak fisik dari adanya *arcing fault*. *Arcing fault* didefinisikan sebagai aliran arus listrik yang mengalir pada saluran yang seharusnya tidak teraliri arus (*arcing fault current*). Arus tersebut menciptakan sebuah plasma busur listrik dan melepaskan sejumlah energi yang berbahaya seperti terlihat pada gambar 2.3. Busur api listrik merupakan bagian dari arus listrik yang besar melalui udara



yang terionisasi. *Arc Flash* merupakan hasil pelepasan energi yang berbahaya karena terciptanya plasma busur listrik antara fasa bus bar satu dengan fasa bus bar lainnya, netral atau *ground*. Plasma energi yang memicu terjadinya *Arc Flash* mengakibatkan beberapa kerugian fisik berupa ledakan bola api yang terhempas ke luar, panas yang dihasilkan ledakan bola api ini jika mengenai tubuh manusia dapat menyebabkan luka bakar yang parah. Cahaya gelombang bertekanan yang dihasilkan oleh ledakan dapat merusak dan menghempaskan orang ataupun peralatan yang ada disekitarnya. Sementara itu bunyi ledakan dapat mengganggu pendengaran dan konduktor yang meleleh menjadi tetesan-tetesan logam cair panas yang berpenjar ke segala penjuru. Secara fisik korban sangat mungkin menderita cedera kronis yang parah dan efek traumatik berkepanjangan berupa kecemasan, depresi, ataupun gejala psikologis lainnya.

Perencanaan kerja dan kepatuhan merupakan syarat mutlak untuk mengurangi terjadinya kemungkinan kecelakaan tragis akibat *Arc Flash*. Syarat ini berupa rincian strategi untuk mengeliminasi dan menanggulangi bahaya *Arc Flash*. Tindakan penyelamatan dan pencegahan yang pertama dapat berupa eliminasi atau substitusi, yaitu pengecekan dan pengujian secara berkala terhadap peralatan dan *grounding*. Tindakan lainnya berupa teknik kontrol yaitu berupa tindakan preventif agar tidak mendekati lokasi dan mengunci serta meninggikan pagar terhadap peralatan dan lokasi bahaya *Arc Flash*. Tindakan selanjutnya adalah berupa administrasi kontrol yang mencakup pelatihan kepada para pekerja akan bahaya dan cara penyelamatan serta tindakan pencegahan *Arc Flash*. tindakan selanjutnya adalah berupa *Personal Protective Equipment* atau PPE yang merupakan peralatan pelindung pribadi yang biasanya dianggap paling efektif sebagai metode perlindungan. PPE mencakup sarung tangan, pakaian tahan api dan pelindung wajah sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Dan tindakan terakhir adalah dengan mengurangi insiden energi dari *Arc Flash* itu sendiri. Dengan pengurangan energi yang dilepaskan, akan mengurangi juga dampak bahaya dari *Arc Flash* ini. Semakin kecil insiden energi tentu lebih aman untuk pekerja dan juga baik untuk *lifetime* dari peralatan itu sendiri.





**Gambar 2.2** Contoh *Arc Flash*

### **2.3 Perhitungan Energi *Arc Flash* Berdasarkan Standar IEEE 1584-2002 [3]**

Perhitungan standar energi *Arc Flash* secara empiris berasal dari pemodelan yang memungkinkan terjadinya *Arc Flash*. Perhitungan diaplikasikan pada sistem dengan *range* tegangan tiga fasa 208 V-15000 V, frekuensi 50-60 Hz, *bolted fault current* 700 A-106 kA. Gap antar konduktor 13 mm- 152 mm dan sistem diuji dengan gangguan hubung singkat tiga fasa.

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002, menentukan nilai *arcing current* saat gangguan tiga fasa diperlukan untuk menentukan waktu operasi CB agar peralatan sistem dapat terlindungi. Persamaan untuk menentukan *arcing current* untuk sistem dibawah 1000 V adalah :

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588V (\lg I_{bf}) - 0,00304G(\lg I_{bf}) \quad (2.1)$$

dimana,

$\lg = \log_{10}$

$I_a = \text{arcing current (kA)}$

$K = -0,153$  untuk *open configurations* dan  $-0,097$  untuk *box configurations*

$I_{bf} = \text{bolted fault current untuk gangguan tiga fasa (kA)}$

$V = \text{tegangan sistem (kV)}$

$G = \text{jarak antar konduktor (mm)}$

Sementara itu untuk menentukan *arcing current* pada sistem 1000 V atau lebih digunakan persamaan berikut:

$$\lg I_a = 0.00402 + 0.983 \lg I_{bf} \quad (2.2)$$

dimana,

$$\lg = \log_{10}$$

$$I_a = \text{ arus Arc Flash / Arcing Current (kA)}$$

$$I_{bf} = \text{bolted three-phase fault at the bus symmetrical rms (kA)}$$

Untuk perhitungan arus *Arc Flash* pada level tegangan 1000 V atau lebih K ( konstanta untuk *open* atau *box configurations*) diabaikan. Sementara itu untuk menghitung besar *incident energi* berdasarkan standar IEEE 1584-2002 digunakan persamaan berikut[3]:

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1.081 \lg I_a + 0.0011 G \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) dapat di sederhanakan menjadi persamaan (2.4)

$$E_n = I_a^{1.081} \times 10^{(K1 + K2 + 0.0011G)} \quad (2.4)$$

dimana:

$$E_n = \text{incident energi (J/cm}^2\text{) normalized untuk waktu dan jarak}$$

$$K1 = -0.792 \text{ untuk konfigurasi terbuka (no enclosure) dan } -0.555 \text{ untuk konfigurasi box (enclosed equipment)}$$

$$K2 = 0 \text{ untuk sistem ungrounded and high-resistance grounded } -0.113 \text{ untuk sistem grounded}$$

$$G = \text{gap antara conductors (mm)}$$

Berdasarkan standar IEEE 1584-2002 persamaan (2.3) di *normalized* terlebih dahulu berdasarkan data untuk waktu *close circuit breaker* 0,2 s atau 200 ms, dan jarak antara titik *Arc Flash* dengan pekerja 610 mm. Setelah dikonversi dari kondisi *normalized* didapatkan persamaan (2.5) dan dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.6) :

$$E = 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) \left( \frac{610}{D} \right)^x \quad (2.5)$$

$$E = 4.184 \times C_f \times E_n \times (t/0.2)(610/D)^x \quad (2.6)$$

Dimana:

$E$  = *incident energi* ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )

$C_f$  = *calculation factor*,

1.0 untuk tegangan diatas 1kV

1.5 untuk tegangan dibawah 1kV

$E_n$  = *incident energi* ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ) *normalized*

$t$  = *arcing time* (detik)

$D$  = jarak antara titik *Arc Flash* dengan pekerja/ *person*

$x$  = *distance x factor*, berdasarkan tabel 2.1 [3]

Standar untuk distance x factor dapat dilihat dalam tabel 2.1 seperti dibawah ini:

**Tabel 2.1** Faktor Untuk Peralatan dan Kelas Tegangan

| <i>System Voltage (kV)</i> | <i>Equipment type</i> | <i>Typical gap between conductors (mm)</i> | <i>Distance x factor</i> |
|----------------------------|-----------------------|--|--------------------------|
| 0.208–1                    | <i>Open air</i>       | 10–40                                      | 2.000                    |
|                            | <i>Switchgear</i>     | 32   | 1.473                    |
|                            | <i>MCC and panels</i> | 25   | 1.641                    |
|                            | <i>Cable</i>          | 13   | 2.000                    |
| >1– 5                      | <i>Open air</i>       | 13–102                                     | 2.000                    |
|                            | <i>Switchgear</i>     | 13–102                                     | 0.973                    |
|                            | <i>Cable</i>          | 13   | 2.000                    |
| >5–15                      | <i>Open air</i>       | 13–153                                     | 2.000                    |
|                            | <i>Switchgear</i>     | 153  | 0.973                    |
|                            | <i>Cable</i>          | 13   | 2.000                    |

Sementara itu jarak standar antar konduktor (*gap*) dan jarak pekerja untuk masing-masing kelas peralatan ditunjukkan oleh tabel 2.2 dan 2.3:



**Tabel 2.2** *Typical Bus Gaps*

| <i>Classes of equipment</i>              | <i>Typical bus gaps (mm)</i> |
|--|------------------------------|
| <i>15kV Switchgear</i>                   | 152                          |
| <i>5kV Switchgear</i>                    | 104                          |
| <i>Low voltage switchgear</i>            | 32                           |
| <i>Low voltages MCCs and panelboards</i> | 25                           |
| <i>cable</i>                             | 13                           |
| <i>other</i>                             | <i>Not required</i>          |

**Tabel 2.3** *Typical Working Distance [3]*

| <i>Classes of equipment</i>              | <i>Typical Working Distance (mm)</i> |
|--|--------------------------------------|
| <i>15kV Switchgear</i>                   | 910                                  |
| <i>5kV Switchgear</i>                    | 910                                  |
| <i>Low voltage switchgear</i>            | 610                                  |
| <i>Low voltages MCCs and panelboards</i> | 455                                  |
| <i>cable</i>                             | 455                                  |
| <i>other</i>                             | <i>To be determined in field</i>     |

#### 2.4 Batas Jarak Perlindungan Arc Flash

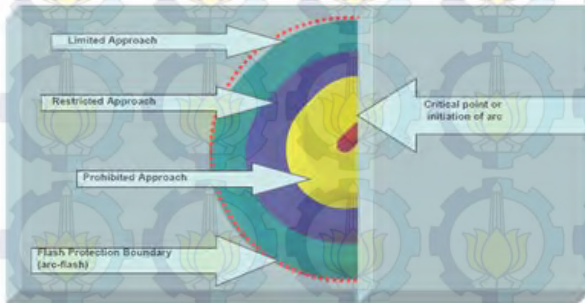
Batas jarak perlindungan terhadap titik *Arc Flash* disebut *flash protection boundary*. Ini merupakan batas jarak tertentu dengan konduktor aktif yang memungkinkan seseorang terpapar bahaya *Arc Flash (Arc-Flash Hazard)*. Batasan jarak ini dapat dikategorikan setelah nilai insiden energi *Arc Flash* diketahui. Untuk meningkatkan kewaspadaan terhadap bahaya *Arc Flash*, pengetahuan tentang *flash protection boundary* sangat penting untuk dipahami sebagai upaya perlindungan baik terhadap peralatan maupun terhadap personal. *Flash protection boundary* seperti terlihat pada gambar 2.4 meliputi :

1. *Limited approach boundary*, merupakan batas perlindungan untuk tidak dilewati oleh orang-orang yang tidak memenuhi syarat kecuali dikawal oleh orang-orang yang berpengalaman. Pada area yang dibatasi biasanya terdapat bahaya sengatan listrik konduktor aktif.
2. *Restricted Approach Boundary*, merupakan batas perlindungan yang hanya boleh dilewati oleh orang-orang yang berpengalaman dan saat melintasi batas ini harus mengenakan pakaian dan



peralatan yang dibutuhkan. Pada area ini, selain *Arc Flash* juga terdapat peningkatan resiko *shock* yang terjadi karena kombinasi *Arc Flash* dengan gerakan tidak sengaja dari para pekerja.

3. *Prohibited Approach Boundary*, merupakan batas perlindungan dimana jika melewati batas ini tidak hanya harus mengenakan pekaian dan peralatan pelindung tetapi juga hanya melibatkan orang-orang yang memenuhi kualifikasi terhadap *Arc Flash hazard* karena pada area ini dianggap para pekerja akan melakukan kontak langsung dengan konduktor aktif.
4. *Flash Protection Boundary*, merupakan batas perlindungan dimana tingkat *incident energi* sama dengan 1,2 cal/cm<sup>2</sup>. Area ini memungkinkan pekerja mengalami dampak cedera parah jika terjadi *Arc Flash* [1].



**Gambar 2.3** Ilustrasi Batas Perlindungan Terhadap Bahaya *Arc Flash*

*Flash protection boundary* dapat ditentukan berdasarkan standar IEEE 1584-2002 dengan menggunakan persamaan berikut:

$$D_B = \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.7)$$

Dimana:

$D_B$  = jarak batas dari titik arcing (mm)

$C_f$  = *Calculation factor*,

1.0 untuk tegangan diatas 1kV

1.5 untuk tegangan dibawah 1kV

$E_n$  = *incident energi normalized*

$E_B$  = incident energi in J/cm2 at the boundary distance

$T$  = waktu arcing (detik)

$X$  = jarak exponent dari tabel 2.1

Atau dapat juga dihitung dengan menggunakan metode Lee [3]

$$D_B = \sqrt{2.412 \times 10^6 V I_{bf} \left( \frac{t}{E_B} \right)} \quad (2.8)$$

Dimana:

$I_{bf}$  = bolted fault current

## 2.5 Personal Protective Equipment (PPE)

*Personal protective equipment* merupakan perlengkapan keselamatan yang harus digunakan oleh *personal* yang akan masuk ke area rawan *Arc Flash*. Perlengkapan ini telah diatur berdasarkan standar NFPA 70E-2009 [4]. PPE dapat dikategorikan berdasarkan besarnya energi yang dihasilkan oleh *Arc Flash* (*incident energi*) serta dampak yang diakibatkan oleh *Arc Flash hazard* terhadap anggota tubuh manusia (*workers*). Contoh perlengkapan keselamatan yang harus digunakan ketika masuk ke area rawan *Arc Flash* dapat dilihat pada gambar 2.5.



**Gambar 2.4** Contoh Perlengkapan Keselamatan

Alat pelindung diri bagi pekerja dikelompokkan berdasarkan kategori insiden energi yang dilepaskan seperti terlihat pada tabel 2.4 berikut:

**Tabel 2.4** Kategori *Personal Protective Equipment* [2]

| Category | Cal/cm <sup>2</sup> | Clothing   |
|----------|---------------------|--|
| 0        | 1.2                 | <i>Untreated Cotton</i>  |
| 1        | 4                   | <i>Flame retardant (FR) shirt and FR pants</i>                                       |
| 2        | 8                   | <i>Cotton underwear FR shirt and FR pants</i>  |
| 3        | 25                  | <i>Cotton underwear FR shirt, FR pants and FR coveralls</i>                          |
| 4        | 40                  | <i>Cotton underwear FR shirt, FR pants and double layer switching coat and pants</i> |

Untuk lebih jelasnya peralatan pelindung diri (PPE) pada masing-masing kategori dijelaskan oleh tabel dibawah ini:

*Personal Protective Equipment* untuk kategori 1 dapat dilihat pada tabel 2.5 berikut:

**Tabel 2.5** *Personal Protective Equipment* Untuk Kategori 1 [5]

| Jenis          | Peralatan dan pakaian pelindung         |
|----------------|---|
| Pakaian        | Pakaian lengan pendek<br>Celana panjang |
| Pelindung mata | Kacamata                                |

*Personal Protective Equipment* untuk kategori 2 dapat dilihat pada tabel 2.6 berikut:

**Tabel 2.6** *Personal Protective Equipment* Untuk Kategori 2 [5]

| Jenis                      | Peralatan dan Pakaian pelindung         |
|----------------------------|---|
| Pakaian                    | Pakaian lengan pendek<br>Celana panjang |
| Pelindung kepala           | Helm                                    |
| Pelindung mata             | Kacamata                                |
| Pelindung wajah dan Kepala | Pelindung wajah dari arc                |



|                  |                     |
|------------------|---------------------|
| Pelindung tangan | Sarung tangan kulit |
| Pelindung kaki   | Sepatu kerja kulit  |

*Personal Protective Equipment* untuk kategori 3 dan 4 dapat dilihat pada tabel 2.7 berikut:

**Tabel 2.7** *Personal Protective Equipment* Untuk Kategori 3 dan 4 [5]

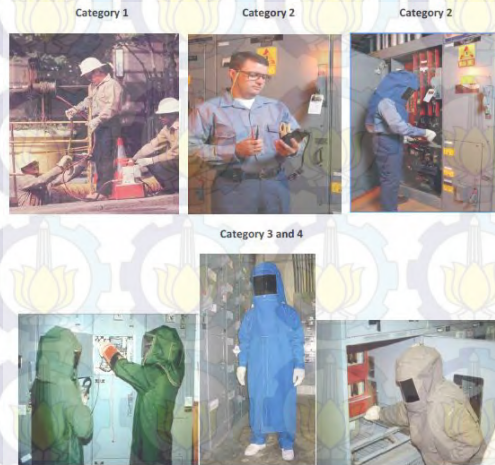
| Jenis                      | Peralatan dan pakaian pelindung                   |
|----------------------------|---|
| Pakaian                    | Pakaian lengan panjang<br>Celana panjang<br>Jaket |
| Pelindung kepala           | Helm  |
| Pelindung mata             | Kacamata  |
| Pelindung wajah dan kepala | <i>Flash suit hood</i><br>Pelindung telinga       |
| Pelindung tangan           | Sarung tangan kulit                               |
| Pelindung kaki             | Sepatu kerja kulit                                |

tabel 2.8 adalah tabel PPE *minimum arc rating* berdasarkan kategori *Arc Flash* yang terjadi pada sebuah sistem kelistrikan [6]:

**Tabel 2.8** *Summary of Protective Clothing Categories (From Table 130.7(C) of NFPA 70E 2004)* [6]

| Hazard/<br>Category | Risk | PPE Minimum Arc<br>Rating (cal/cm2) | PPE Minimum Arc<br>Rating (J/cm2) |
|---------------------|------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 0                   |      | N/A                                 | N/A                               |
| 1                   |      | 4                                   | 16.74                             |
| 2                   |      | 8                                   | 33.47                             |
| 3                   |      | 25                                  | 104.8                             |
| 4                   |      | 40                                  | 167.37                            |

Ilustrasi klasifikasi alat pelindung diri berdasarkan kategori dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut:



**Gambar 2.5** Ilustrasi klasifikasi Alat Perlindungan Diri Berdasarkan Kategori [2]

## 2.6 Gangguan Pada Sistem Kelistrikan

Suatu sistem kelistrikan sangat memungkinkan mengalami suatu gangguan yang mengakibatkan keadaan tidak normal pada rangkaian sistem tersebut. Berbagai macam gangguan ini menyebabkan ketidakberlangsungan kerja sistem dan mempunyai efek merusak kontinuitas pelayanan dan peralatan. Untuk melindungi peralatan dari dampak kerusakan gangguan maka sistem proteksi tenaga listrik harus dapat mengisolasi arus gangguan (*fault current*) dan menjaga kontinuitas daya pada bagian sistem yang tidak mengalami gangguan.

Secara umum klasifikasi gangguan pada sistem tenaga listrik disebabkan oleh 2 faktor, yaitu:

1. Gangguan yang berasal dari dalam sistem
2. Gangguan yang berasal dari luar sistem

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain [7]:

1. Tegangan dan arus abnormal
2. Pemasangan yang kurang baik

3. Kesalahan mekanis karena proses penuaan
4. Beban lebih
5. Kerusakan material seperti isolator pecah, kawat putus, atau kabel cacat isolasinya.

Sedangkan untuk gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain [7]:

1. Gangguan-gangguan mekanis karena pekerjaan galian saluran lain. Gangguan ini terjadi terutama pada sistem kelistrikan bawah tanah.
2. Pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir. Pada gangguan surja petir dapat mengakibatkan gangguan tegangan lebih dan dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus isolasi peralatan (*breakdown*).
3. Pengaruh lingkungan seperti pohon, binatang dan benda-benda asing serta akibat kecerobohan manusia.

Selain gangguan-gangguan diatas terdapat gangguan langsung pada sistem kelistrikan berupa [8]:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa
2. Gangguan hubung singkat 2 fasa
3. Gangguan hubung singkat 1 fasa
4. Gangguan beban lebih (*overload*), dan
5. Gangguan tegangan lebih (*over voltage*)

Bila ditinjau dari segi lamanya waktu gangguan, maka dapat dikelompokkan menjadi [7]:

1. Gangguan yang bersifat temporer, yang dapat hilang dengan sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangannya. Gangguan sementara jika tidak dapat hilang dengan segera, baik hilang dengan sendirinya maupun karena bekerjanya alat pengaman dapat berubah menjadi gangguan permanen.
2. Gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskannya diperlukan tindakan perbaikan dan/atau menyingkirkan penyebab gangguan tersebut.

Untuk gangguan yang bersifat sementara setelah arus gangguannya terputus misalnya karena terbukanya *circuit breaker* (CB) oleh pengamannya, peralatan atau saluran yang terganggu tersebut siap dioperasikan kembali.



Sedangkan pada gangguan permanen terjadi kerusakan yang bersifat permanen sehingga baru bisa dioperasikan kembali setelah bagian yang rusak diperbaiki atau diganti.

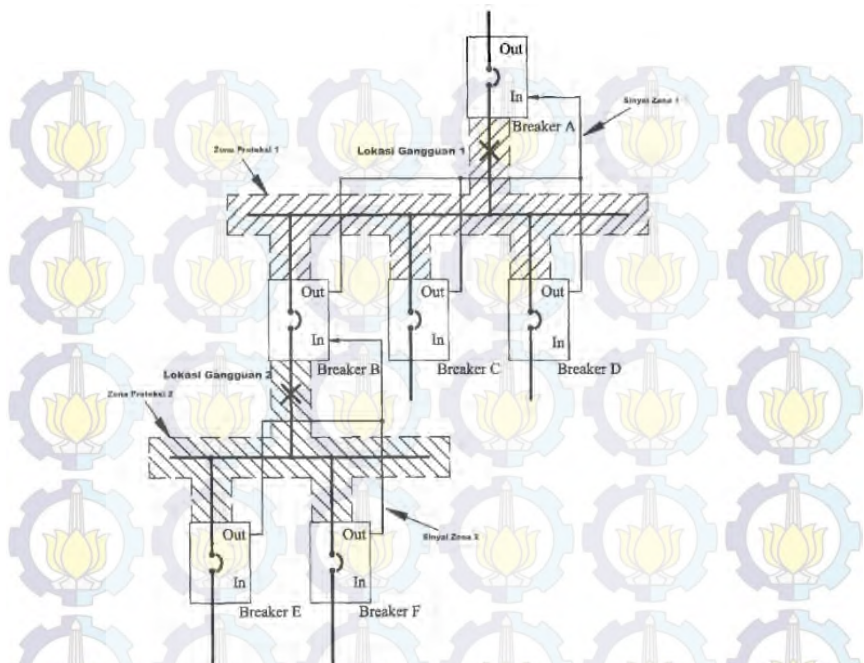
Pada saat terjadi gangguan akan mengalir arus yang sangat besar pada fasa yang terganggu menuju titik gangguan, dimana arus gangguan tersebut mempunyai harga yang jauh lebih besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga terjadi kenaikan temperatur yang dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik yang digunakan.

## **2.7 Definisi Zone Selective Interlocking (ZSI)**

ZSI merupakan metode pengurangan insiden energi dari *Arc Flash* yang efektif dan relatif murah. Instalasi ZSI hanya membutuhkan kabel dan tenaga kerja jika circuit breaker *Trip Unit* sudah memiliki fitur ZSI [9]. Dua alasan utama dalam penggunaan ZSI adalah seberapa baik dan cocok digunakan pada *switchgear* yang ada serta pemasangan ZSI tidak mengubah prosedur atau operasi dari *switchgear*. Konsep ZSI bermula dari rele bus differensial yang dianggap terlampau mahal dan membutuhkan ruang banyak akibat dari pemasangan current transformer (CT) sehingga sejak itu ZSI dikembangkan karena tidak membutuhkan ruang besar dan lebih murah. ZSI dapat bekerja dalam 3 level, namun yang lebih efektif dan sering digunakan adalah 2 level [10].

Cara kerja dari ZSI menggunakan prinsip komunikasi antar *trip unit* sehingga antara *trip unit* satu dengan *trip unit* lainnya dapat mengirimkan sinyal maupun menerima sinyal. Sinyal tersebut digunakan untuk mengetahui daerah kerja dari CB untuk *Trip* sehingga pengamanan dari gangguan lebih cepat dan efektif. Cara kerja dari ZSI lebih mudah jika dijelaskan seperti dalam gambar 2.7.

Diasumsikan bahwa terjadi gangguan pada sisi beban dari breaker B yakni di lokasi gangguan 2. Baik breaker A dan breaker B merasakan gangguan. Breaker B mengirim sinyal *blocking* ke breaker A sebagai tanda agar breaker A mengerti bahwa gangguan berada pada zona proteksi breaker B. Sinyal *blocking* tersebut sekaligus memberi informasi ke breaker A untuk *Trip* sesuai *time delay* atau sebagai *back up* dari breaker B. Maka breaker B yang bertugas untuk mengamankan gangguan tersebut tanpa *delay* [9]. *Timing* dari ZSI sendiri adalah sebesar 0.01 detik sehingga sinyal *blocking* dapat dikirim terlebih dahulu sebelum breaker *trip* tanpa *delay* [13].



**Gambar 2.6** Skema Metode ZSI

Namun jika gangguan terjadi pada *switchgear* atau pada gambar berada pada lokasi gangguan 1 (seperti yang terjadi saat memutar CB), maka tidak ada *blocking signal* yang akan dikirimkan ke breaker A atau bisa disebut breaker A tidak menerima sinyal. Sehingga, ketika breaker A merasakan ada gangguan namun tidak mendapat sinyal *blocking*, maka breaker A akan *Trip* secara instant tanpa waktu tunda[9]. Breaker satu dengan lainnya dihubungkan dengan kabel untuk berkomunikasi dengan mengirimkan *blocking signal*. Sehingga dari cara kerja tersebut insiden energi dari *Arc Flash* dapat dikurangi karena berdasarkan prinsip waktu *Trip Unit* kerja semakin cepat mengamankan gangguan, maka insiden energi yang terlepas semakin kecil. Dalam proses instalasi dari ZSI sendiri perlu dilakukan manajemen waktu dan tenaga karena dapat memakan waktu yang tidak sedikit.

Dalam penerapan ZSI sebagai solusi dari pengurangan energi *Arc Flash* terdapat beberapa yang harus diperhatikan yakni [9]:

1. Ini bekerja secara otomatis – (tidak perlu adanya tindakan pencegahan)
2. Ini hanya berdampak pada karakteristik *short time delay* dan *ground fault time delay*
3. Arus gangguan arcing harus berada di atas setting STPU (*short time pick up*) untuk mengurangi insiden energi
4. ZSI membutuhkan tambahan 2 cycle (maksimum 3 cycle) agar breaker *Trip* dibandingkan dengan instant *Trip* yang mencapai 5-6 cycle
5. ZSI memerlukan prosedur tes breaker yang sedikit berbeda selama perawatan atau kalibrasi

ZSI sendiri awalnya merupakan kemampuan *Trip Unit* pada *low voltage circuit breaker* untuk mengurangi fault stress pada peralatan. Namun dalam pengembangannya dapat digunakan untuk mengurangi insiden energi *Arc Flash* karena berdasarkan semakin cepat pengaman berhasil mengamankan gangguan maka semakin kecil pula insiden energi *Arc Flash* yang dilepaskan sehingga insiden energi yang seringkali sangat besar karena hanya berdasarkan koordinasi proteksi biasa tanpa memperhitungkan *Arc Flash*, kini dengan menggunakan metode ZSI ini maka prinsip koordinasi dan selektivitas menjadi tidak berseberangan. artinya dengan koordinasi proteksi yang benar dan sesuai standar pun insiden energi yang terjadi pada *switchgear* tegangan rendah dapat dikurangi menjadi lebih kecil. Selama ini timbul persepsi bahwa koordinasi proteksi yang sesuai standar tidak bisa mengamankan *Arc Flash* dengan baik.

Hal ini diakibatkan oleh *time delay* antara *upstream circuit breaker* dan *downstream circuit breaker* harus memenuhi dari standar kaidah koordinasi proteksi, yakni 0.2 detik - 0.4 detik sehingga *upstream circuit breaker* yang memiliki selang waktu sekian detik tersebut akan mengalami insiden energi *Arc Flash* yang besar karena dengan arus gangguan yang sama memiliki waktu *Trip* yang lebih panjang.

Pada Tugas Akhir ini simulasi ZSI dimodelkan menggunakan *Software Easy Power*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perubahan bentuk kurva pengaman saat teknik ZSI diaplikasikan pada sistem tegangan rendah. Selain itu dengan *Software Easy Power* akan diketahui seberapa besar hasil dari pengurangan insiden energi *Arc Flash*. Contoh



*Trip device* pada sistem tegangan rendah yang memiliki fitur ZSI pada *Software Easy Power* dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut ini:



**Gambar 2.7** Fitur ZSI di LVCB pada *Software Easy Power 9.7*

Gambar 2.8 merupakan contoh pengisian data dari LVCB di *Software Easy Power*. LVCB tersebut memiliki fitur ST ZSI sehingga ZSI bekerja dengan waktu *Short Time*. Kolom *Upstream Breaker ID* merupakan CB yang berada di atasnya dan juga memiliki fitur ZSI. Sehingga antar CB bisa berkomunikasi untuk mengirim sinyal *blocking* ke CB atasnya. Untuk LVCB yang berada paling akhir atau paling atas, kolom *Upstream Breaker ID* tidak diisi yang artinya LVCB tersebut hanya menerima sinyal *blocking* dan tidak mengirim sinyal apapun ke CB lain.

## **BAB 3**

### **SISTEM KELISTRIKAN PT. CONOCOPHILLIPS INDONESIA INC. LTD. PLANT BELIDA**

#### **3.1 Sistem Kelistrikan Conocophillips Indonesia pada Plant Belida**

Sistem kelistrikan PT. Conocophillips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida mempunyai dua generator utama dan lima generator cadangan. Terdapat beberapa jenis beban pada plant ini dan mayoritas beban pada plant ini adalah motor induksi. Untuk mensupply beban yang ada, plant belida memiliki 3 jenis level tegangan berbeda yaitu 4.16 kV, 0.48 kV dan 0.208 kV dengan frekuensi 60 Hz.

Pada sistem kelistrikan di plant Belida terdapat Sistem Electrical Submersible Pump (ESP). Sistem ini berfungsi memompa minyak dari dalam perut bumi. Salah satu sistem yang didalamnya terdapat sistem *Electric Submersible Pump* (ESP) adalah ID WHPB.

Sistem kelistrikan ini terpasang pada bus LGMV-1 yang berfungsi sebagai main bus, sistem ini terbagi menjadi tiga level tegangan yaitu 4.16 kV, 0.48 kV dan 0.208 kV. Trafo utama pada sistem kelistrikan WHPB ini memiliki ID WHPB-T yang memiliki kapasitas 500KVA. Dari trafo utama WHPB terhubung ke bus MCC\_WHPB yang kemudian ke beban.

Terdapat tiga sistem ESP yang terpasang pada bus MCC-WHPB. Sistem ESP tersebut memiliki penggerak utama berupa motor induksi. Motor induksi pada masing-masing sistem ESP memiliki ID VSP-WHPB-3E, AC-WHPB-7D dan JWP-WHPB-5A. Pada tugas akhir ini juga menganalisa motor induksi dengan ID HVACC-WHPB-1A1.

Antara MCC-WHPB yang berada dipermukaan dengan sistem ESP yang berada didalam sumur, dihubungkan oleh kabel sepanjang lebih dari seribu meter. Kabel tersebut berfungsi sebagai penghantar daya listrik dan penghantar sistem control untuk sistem ESP.

#### **3.2 Data Kelistrikan Plant Belida**

PT. Conocophillips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida memiliki sistem kelistrikan berbentuk radial dengan bus ID LGMV-1 sebagai bus utama dan memiliki delapan jalur bebann. Bus LGMV-1 memiliki level tegangan 4.16 kV yang disupply langsung oleh dua generator utama.

### 3.2.1 Sistem Pembangkitan

Pada sistem kelistrikan plant Belida memiliki total supply utama yang terletak pada bus LGMV-1 sebesar 7MW yang terbagi menjadi dua generator dengan masing-masing generator sebesar 3.5MW. Sedangkan tiga generator cadangan pada bus LV-101 sebesar 1063 kW, satu generator cadangan untuk supply bus LGLV sebesar 750 kW dan satu generator cadangan pada bus MCC-WHPB sebesar 360 kW. Seluruh generator cadangan tidak dioperasikan ketika generator utama beroperasi normal.

**Tabel 3.1** Data Pembangkit Utama *Plant* Belida

| Nama Pembangkit | Kapasitas Daya | Keterangan   |
|-----------------|----------------|--|
| ZAN-8870-B      | 3.5 MW         | 4.16 kV; swing.  |
| ZAN-8870-A      | 3.5 MW         | 4.16 kV; 85% pf; 4118kVA; eff 95%; 2 pole; Mvar control. |

**Tabel 3.2** Data Pembangkit Cadangan *Plant* Belida

| Nama Pembangkit | KapasitasDaya | Keterangan  |
|-----------------|---------------|---|
| ZAN-2910        | 1.063 MW      | 0.48 kV; swing.   |
| ZAN-2911        | 1.063 MW      | 0.48 kV; swing.   |
| ZAN-2912        | 1.063 MW      | 0.48 kV; swing.   |
| ZAN-8871        | 0.750 MW      | 0.48 kV; 80% pf; 938 kVA; eff 95%; 4 pole; Voltage control. |
| GEN WHPB EM     | 0.360 MW      | 0.48 kV; 80% pf; 450 kVA; eff 95%; 4 pole; Voltage control. |

### 3.2.2 Sistem Distribusi

Penyaluran daya beban pada plant Belida menggunakan beberapa trafo dengan rating tegangan yang berbeda-beda pada setiap busnya tergantung dengan level tegangan pada beban. Berikut ini adalah daftar beberapa bus dan transformator yang digunakan pada plant Belida.



**Tabel 3.3** Data Bus *Plant* Belida

| NO | ID BUS          | TEGANGAN (kV) |
|----|-----------------|---------------|
| 1  | LV-101-A        | 0.480 kV      |
| 2  | DPPA-MCC-1      | 0.480 kV      |
| 3  | LV-101-B        | 0.480 kV      |
| 4  | DPPA-MCC-2      | 0.480 kV      |
| 5  | LGLV-1A         | 0.480 kV      |
| 6  | LO-HVAC-1-9JL   | 0.208 kV      |
| 7  | LGLV-1B         | 0.480 kV      |
| 8  | LGES-1N-11CL    | 0.208 kV      |
| 9  | LGES-1N-12AR    | 0.208 kV      |
| 10 | MCC-WHPB        | 0.480 kV      |
| 11 | BUS-LP-WHPB-3CL | 0.208 kV      |
| 12 | BUS-WHPB-4K     | 0.208 kV      |
| 13 | LGLV-2A         | 0.480 kV      |
| 14 | LGLT-SWGR2-B    | 0.208 kV      |
| 15 | LGLT-GEC-B      | 0.208 kV      |
| 16 | LGLT-REF-B      | 0.208 kV      |
| 17 | LGLV-2B         | 0.480 kV      |

**Tabel 3.4** Data Transformator *Plant* Belida

| NO | TRANSFORMATOR   | PRIMER  | SEKUNDER | KVA  |
|----|-----------------|---------|----------|------|
| 1  | DPPAT1          | 4.16 kV | 0.48 kV  | 1500 |
| 2  | DPPAT2          | 4.16 kV | 0.48 kV  | 1500 |
| 3  | LG-T1           | 4.16 kV | 0.48 kV  | 2000 |
| 4  | LG-T2           | 4.16 kV | 0.48 kV  | 2000 |
| 5  | WHPB-T          | 4.16 kV | 0.48 kV  | 500  |
| 6  | LG-T3           | 4.16 kV | 0.48 kV  | 2000 |
| 7  | LG-T4           | 4.16 kV | 0.48 kV  | 2000 |
| 8  | LO-HVAC-1-9JL-T | 0.48 kV | 0.208 kV | 30   |
| 9  | LGES-1N-11CL-T  | 0.48 kV | 0.208 kV | 15   |
| 10 | LGES-1N-12AR    | 0.48 kV | 0.208 kV | 45   |
| 11 | LGES-1S-8       | 0.48 kV | 0.208 kV | 30   |
| 12 | LGLT-SWGR2-B    | 0.48 kV | 0.208 kV | 10   |
| 13 | LGLT-GEC-B      | 0.48 kV | 0.208 kV | 10   |
| 14 | LGLT-REF-B      | 0.48 kV | 0.208 kV | 10   |
| 15 | BUS-LP-WHPB-3CL | 0.48 kV | 0.208 kV | 50   |
| 16 | BUS-WHPB-4K     | 0.48 kV | 0.208 kV | 30   |

### 3.2.3 Sistem Beban

Mayoritas beban pada plant Belida adalah motor induksi yang kebanyakan terdapat pada tegangan 0.48 kV.

### 3.3 Data Kelistrikan WHPB

Salah satu sistem yang terdapat pada plant Belida adalah sistem kelistrikan WHPB yang mempunyai sistem *Electric Submersible Pump* (ESP). Sistem ini disupply oleh dua generator utama dan mempunyai satu generator cadangan dengan ID GEN WHPB EM. Generator ini mempunyai kapasitas 0.360 MW dan terletak pada bus MCC-WHPB. Generator ini dioperasikan apabila dua generator utama mati. Gambar model kelistrikan WHPB ditunjukkan oleh gambar 3.1.

#### 3.3.1 Sistem Distribusi WHPB

Sistem distribusi WHPB terdiri dari 3 transformer, 8 bus dan kabel untuk menyalurkan daya ke beban. Berikut data bus, transformer dan kabel.

**Tabel 3.5** Data Bus WHPB

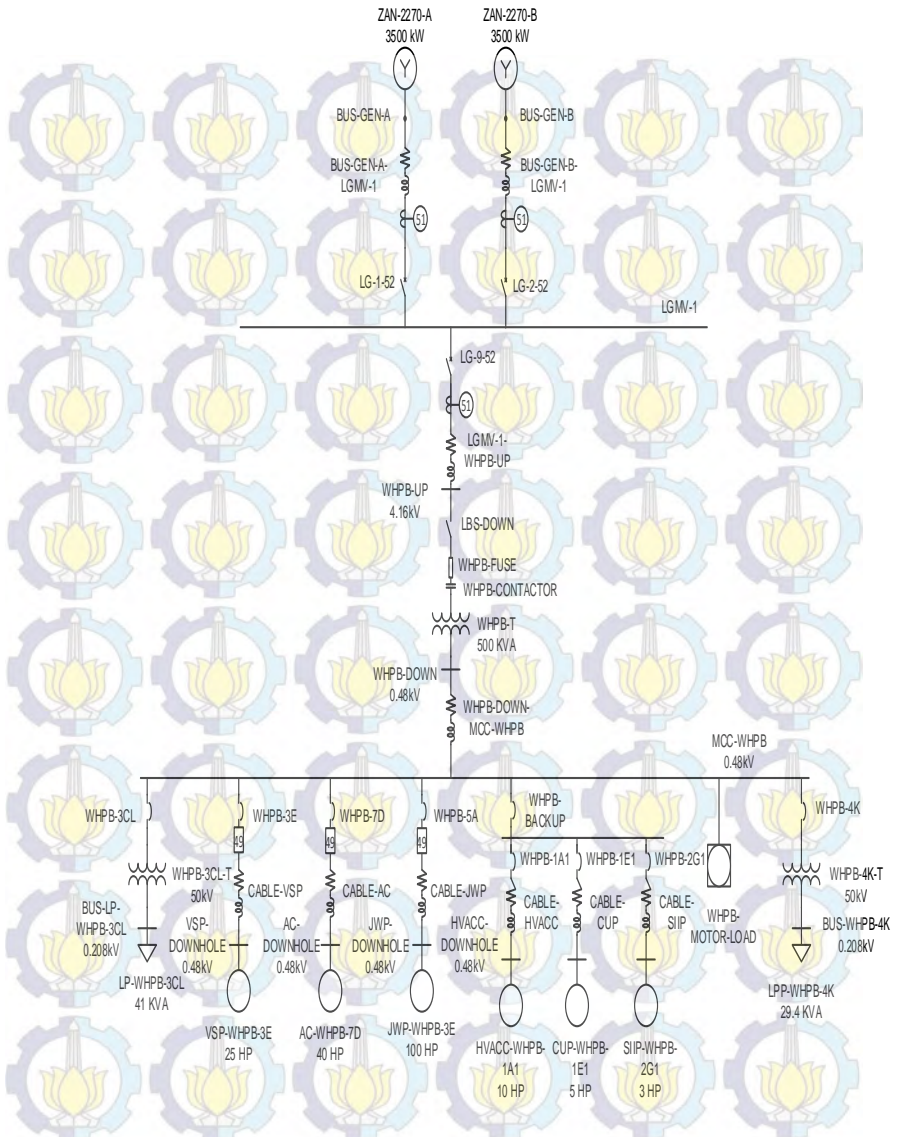
| NO | ID BUS          | TEGANGAN (kV) |
|----|-----------------|---------------|
| 1  | WHPB-UP         | 4.16          |
| 2  | WHPB-DOWN       | 0.48          |
| 3  | MCC-WHPB        | 0.48          |
| 4  | VSP-DOWNHOLE    | 0.48          |
| 5  | AC-DOWNHOLE     | 0.48          |
| 6  | JWP-DOWNHOLE    | 0.48          |
| 7  | BUS-LP-WHPB-3CL | 0.208         |
| 8  | BUS-WHPB-4K     | 0.208         |

**Tabel 3.6** Data Transformator WHPB

| NO | TRANSFORMATOR | PRIMER  | SEKUNDER | KVA |
|----|---------------|---------|----------|-----|
| 1  | WHPB-T        | 4.16 kV | 0.48 kV  | 500 |
| 2  | WHPB-3CL-T    | 0.48 kV | 0.208 kV | 50  |
| 3  | WHPB-4K-T     | 0.48 kV | 0.208 kV | 30  |

**Tabel 3.7** Data Kabel WHPB

| NO | ID KABEL              | PANJANG (FT) |
|----|-----------------------|--------------|
| 1  | WHPB-UPLGMV-1-WHPB-UP | 16000        |
| 2  | WHPB-DOWN-MCC-WHPB    | 400          |
| 3  | CABLE-VSP             | 3281         |
| 4  | CABLE-AC              | 3281         |
| 5  | CABLE-JWP             | 3281         |



**Gambar 3.1 Model Sistem Kelistrikan WHPB**



### 3.3.2 Data Beban

Ada tiga jenis beban pada sistem kelistrikan WHPB yaitu motor induksi, lump load dan static load. Beban ESP yang akan di simulasikan adalah beban motor induksi dengan ID VSP-WHPB-3E, AC-WHPB-7D dan JWP-WHPB-5A. Pada tugas akhir ini disimulasikan pula beban motor induksi dengan ID HVACC-WHPB-1A1. Berikut data beban sistem kelistrikan WHPB.

**Tabel 3.8** Data BebanWHPB

| No | ID Beban      | Rating   | Rated (kV) | Jenis Beban   |
|----|---------------|----------|------------|---------------|
| 1  | ACC-WHPB-6E   | 2 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 2  | AC-WHPB-7D    | 40 HP    | 0.48       | Motor Induksi |
| 3  | AHF-WHPB-5E   | 3 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 4  | BC-WHPB-3AL   | 14.1 kVA | 0.48       | Static        |
| 5  | CUP-WHPB-1E   | 5 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 6  | DH-WHPB-1J    | 18.8 kVA | 0.48       | Static        |
| 7  | DTP-WHPB-2J   | 5 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 8  | FWP-WHPB-2L   | 7.5 HP   | 0.48       | Motor Induksi |
| 9  | HIIP-WHPB-3J  | 2 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 10 | HVACC-WHPB-1A | 10 HP    | 0.48       | Motor Induksi |
| 11 | JWP-WHPB-5A   | 100 HP   | 0.48       | Motor Induksi |
| 12 | LPP-WHPB-4K   | 29.4 kVA | 0.208      | Static        |
| 13 | LP-WHPB-3CL   | 41 kVA   | 0.208      | Static        |
| 14 | PF-WHPB-5J    | 1 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 15 | SIIP-WHPB-2G  | 3 HP     | 0.48       | Motor Induksi |
| 16 | VSP-WHPB-3E   | 25 HP    | 0.48       | Motor Induksi |
| 17 | WRCD-WHPB-2AL | 35.2 kVA | 0.46       | Lump          |

## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISA

#### 4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan

Tugas akhir ini membahas tentang pengurangan insiden energi *Arc Flash* sistem tegangan rendah 0.48 kV di PT. Conocophillips Indonesia Inc. Ltd. plant Belida. Proses pengurangan insiden energi ini dilakukan dengan teknik *Zone Selective Interlocking*. Setelah didapatkan kondisi *resetting* dan koordinasi pengaman yang benar, selanjutnya diterapkan teknik ZSI untuk mendapatkan insiden energi *Arc Flash* yang lebih kecil tanpa merusak koordinasi pengaman yang ada sehingga lebih efektif dan efisien.

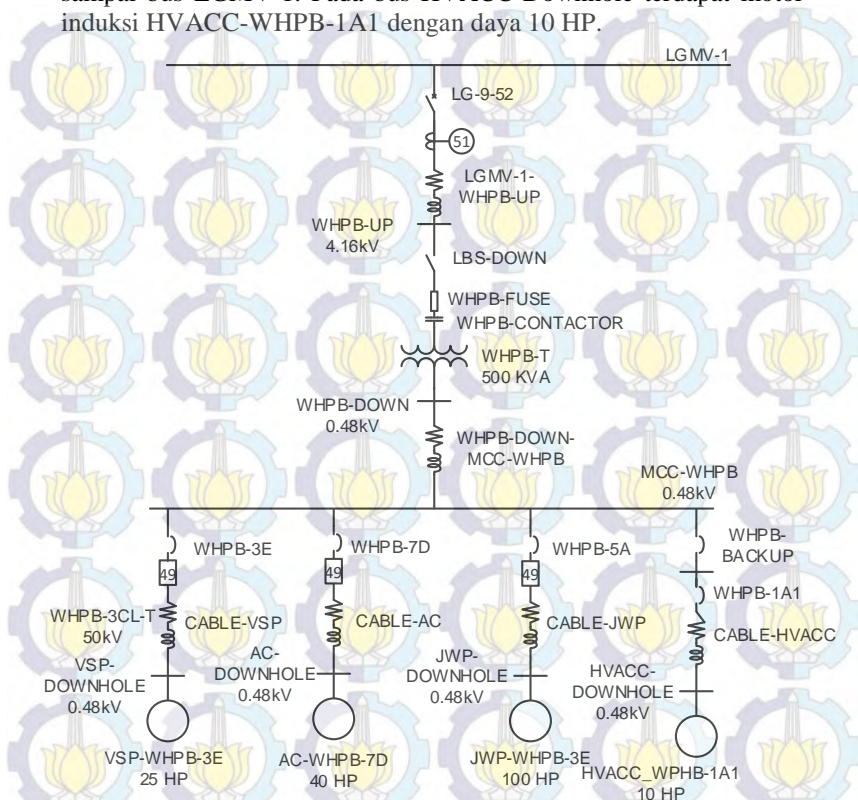
Sistem kelistrikan plant Belida dimodelkan dalam bentuk Single Line Diagram (SLD) dengan menggunakan ETAP 12.6. Selanjutnya dilakukan simulasi aliran daya (*load flow*) dan hubung singkat (*short circuit*). Studi aliran daya disini dimaksudkan untuk melihat apakah sistem kelistrikannya sudah baik dan tidak mengalami kelebihan pembebanan. Simulasi hubung singkat yang dilakukan adalah hubung singkat antar fasa minimum (30 cycle) serta hubung singkat maksimum 3 fasa (1/2 cycle).

Kemudian dengan data hasil tersebut dilakukan perbaikan-perbaikan koordinasi pengaman untuk mendapatkan hasil koordinasi yang mampu mengamankan gangguan. Kemudian dari hasil setting pengaman tersebut digunakan untuk menghitung insiden energi *Arc Flash* yang terjadi. Kemudian dengan menggunakan Software *Easy Power* di simulasikan teknik *Zone Selective Interlocking* untuk mengurangi insiden energi *Arc Flash* yang terjadi.

Dari bagian sistem kelistrikan plant Belida dianalisa 4 tipikal sistem operasi, yaitu:

1. Tipikal 1 : koordinasi sistem pengaman dari bus VSP-Downhole sampai bus LGMV-1. Pada bus VSP-Downhole terdapat motor induksi VSP-WHPB-3E dengan daya 25 HP.
2. Tipikal 2 : koordinasi sistem pengaman dari bus AC-Downhole sampai bus LGMV-1. Pada bus AC-Downhole terdapat motor induksi AC-WHPB-7D dengan daya 40 HP.
3. Tipikal 3 : koordinasi sistem pengaman dari bus JWP-Downhole sampai bus LGMV-1. Pada bus JWP-Downhole terdapat motor induksi JWP-WHPB-5A dengan daya 100 HP.

4. Tipikal 4 : koordinasi sistem pengamanan dari bus HVACC-Downhole sampai bus LGMV-1. Pada bus HVACC-Downhole terdapat motor induksi HVACC-WHPB-1A1 dengan daya 10 HP.



**Gambar 4.1** Model Sistem Kelistrikan *Plant* Belida Yang Dianalisa

Keempat tipikal sistem kelistrikan diatas memiliki karakteristik yang khas karena sistem kelistrikan diatas menggunakan kabel sepanjang seribu meter yang menghubungkan motor induksi pada bus DOWNHOLE dengan bus MCC-WHPB. Motor induksi pada bus DOWNHOLE berfungsi sebagai penggerak utama *Electric Submersible Pump* (ESP) yang berada didalam sumur minyak, sedangkan bus MCC-WHPB berfungsi sebagai bus control peralatan dan berada pada permukaan.



Dengan panjang kabel DOWNHOLE yang mencapai seribu meter, sistem ESP memiliki impedansi yang cukup besar. Sehingga, jika terjadi arus hubung singkat pada bagian downhole, arus hubung singkat ynnng dirasakan oleh peralatan pengaman yang terletak pada bagian permukaan lebih kecil dari arus yang terjadi pada bagian downhole. Jika pemasangan dan setting peralatan pengaman tidak tepat, peralatan pengaman tidak akan berfungsi sebagaimana mestinya dan tidak dapat melindungi sistem.

## 4.2 Pengaturan Pengaman Arus Lebih

Peralatan pengaman arus lebih memiliki 2 tahap setting yaitu setting untuk beban penuh dan setting untuk hubung singkat. Arus beban penuh digunakan untuk menentukan arus maksimal dari peralatan yang dilindungi. Sedangkan arus hubung singkat digunakan untuk menentukan besar arus gangguan yang terjadi pada peralatan tersebut. Adapun arus hubung singakta pada plant Belida ditunjukkan pada table 4.1

**Tabel 4.1** Arus Hubung Singkat

| BUS            |      | Isc MAX 1/2<br>CYCLE | Isc MIN 30<br>CYCLE |
|----------------|------|----------------------|---------------------|
| ID             | kV   | A                    | A                   |
| WHPB-UP        | 4.16 | 2.200                | 1.550               |
| WHPB-DOWN      | 0.48 | 7.410                | 5.200               |
| MCC-WHPB       | 0.48 | 6.940                | 4.840               |
| VSP-DOWNHOLE   | 0.48 | 1.480                | 1.160               |
| AC-DOWNHOLE    | 0.48 | 1.550                | 1.160               |
| JWP-DOWNHOLE   | 0.48 | 1.890                | 1.160               |
| MOTOR-LOAD     | 0.48 | 6.940                | 4.840               |
| HVACC-DONWHOLE | 0.48 | 6.900                | 4.840               |

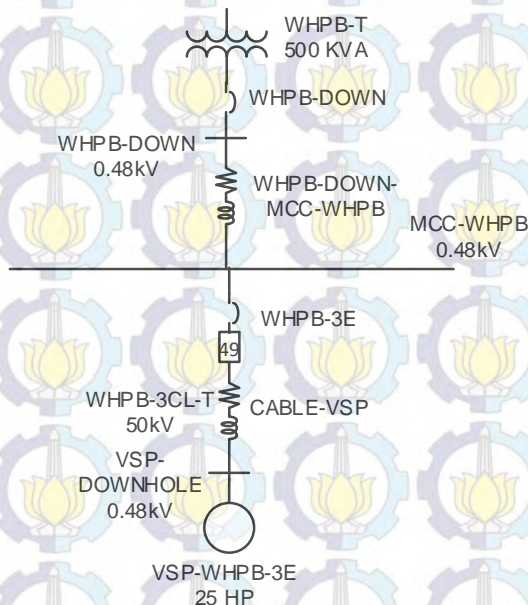
## 4.3 Simulasi Koordinasi Pengaman Kondisi Eksisting

Analisa setting eksisting peralatan pengaman dilakukan dengan menggambarkan kurva kerja peralatan pengaman yang telah disetting oleh perusahaan. Analisa eksisting ini dimaksudkan untuk melihat dan meninjau ketepatan setting peralatan oleh perusahaan sebagai dasar untuk perbaikan jika terdapat kekurangan tepatan dalam mensetting peralatan.

Berikut setting eksisting peralatan pengaman dari keempat tipikal sistem kelistrikan plant belida dan analisisnya.

#### 4.3.1 Simulasi pada Tipikal 1

Gambar 4.2 adalah model single diagram peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 1, dimulai dari Trafo WHPB sampai ke motor VSP-WHPB-3E dengan kapasitas 25HP. Pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-WHPB-3E, rele overload (49) dan LVCB-WHPB-DOWN.



**Gambar 4.2** Model Sistem Kelistrikan Tipikal 1

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor VSP-WHPB-3E kapasitas 25HP maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB WHPB 3E. Jika CB WHPB 3E gagal untuk mengamankan, CB WHPB-DOWN akan menjadi back up sekaligus sebagai pelindung dari bus MCC-WHPB

Dari gambar model single line diagram peralatan eksisting pada tipikal koordinasi 1, terdapat 3 peralatan pengaman yaitu :

1. LVCB WHPB-3E dan rele overload (49) digunakan untuk mengamankan motor VSP-WHPB-3E, 480 volt yang memiliki

kapasitas 25HP dan mengamankan overload beban yang terjadi pada motor VSP-WHPB-3E.

2. LVCB WHPB-DOWN digunakan untuk mengamankan jalur yang menghubungkan dari sekunder trafo ke bus MCC-WHPB dan juga sebagai back up pengaman LVCB WHPB-3E.

Berikut setting pengaman kondisi eksisting yang di dapat dari data sekunder seperti terlihat pada table 4.2 :

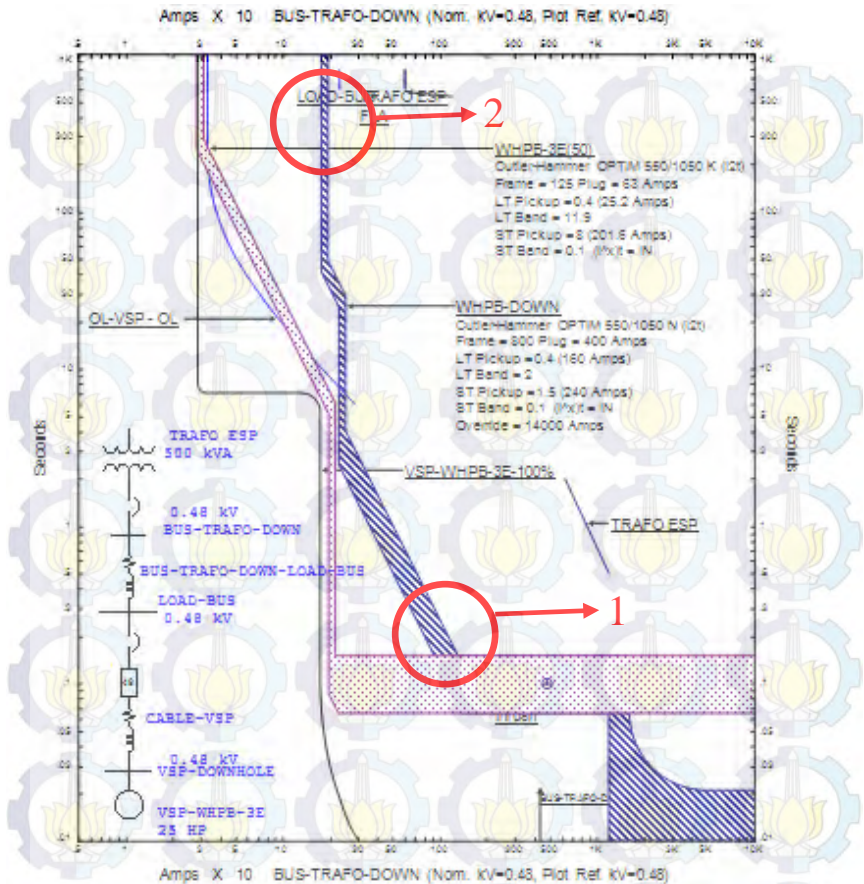
**Tabel 4.2** Setting Pengaman Eksisting Tipikal 1

| ID peralatan pengaman & Model                                    | Setting    |                  |
|--|------------|------------------|
| WHPB-3E(50)<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (12t) | Sensor     | 63               |
|  | LT Pickup  | 0.4              |
|  | LT Band    | 11.9             |
|  | ST Pickup  | 8                |
|  | ST Band    | 0.1              |
| OL-VSP<br>Model:<br>Siemens<br>3UF50                             | Type       | Class 10         |
|  | Trip Range | 25 – 100 Primary |
|  | Trip       | 28.19            |
|  | Trip Amps  | 28.19            |
| WHPB-DOWN<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (12t)   | Sensor     | 400              |
|  | LT Pickup  | 0.4              |
|  | LT Band    | 2                |
|  | ST Pickup  | 2.7              |
|  | ST Band    | 0.1              |

Dari data eksisting peralatan pengaman, selanjutnya dilakukan penggambaran kurva kerja peralatan dengan menggunakan paket program dari ETAP 12.6 yaitu peralatan pengaman (*STAR-Protective Device Coordination*). Hal ini dilakukan untuk melihat bagaimana koordinasi pengaman kondisi eksisting pada tipikal 1. Dilakukan pula simulasi *Arc Flash* dan nilai insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan karena koordinasi pengaman kondisi eksisting masih terdapat kesalahan sehingga belum tercapainya sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan tipikal 1.

Hasil dari penggambaran kurva kerja peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 1 dapat dilihat pada gambar 4.3





**Gambar 4.3** Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 1

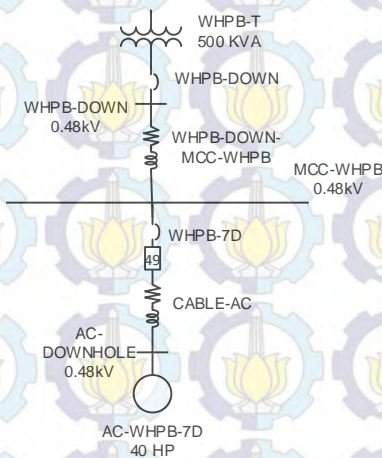
Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu :

1. Setting waktu CB WHPB-3E dan CB WHPB-DOWN di set *trip* dalam time dial yang sama. Akibatnya jika terjadi gangguan hubung singkat di motor VSP-WHPB-3E maka semua CB akan bekerja (*trip*) dalam waktu yang bersamaan. Hal ini akan mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan.

2. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN masih berada di bawah nilai dari FLA sekunder trafo sehingga FLA akan diasumsikan sebagai gangguan.

#### 4.3.2 Simulasi pada Tipikal 2

Gambar 4.4 adalah model single diagram peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 2, dimulai dari Trafo WHPB sampai ke motor AC-WHPB-7D dengan kapasitas 40HP. Pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-WHPB-7D, rele overload (49) dan LVCB-WHPB-DOWN.



**Gambar 4.4** Model Sistem Kelistrikan Tipikal 2

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor AC-WHPB-7D kapasitas 40HP maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB WHPB 7D. Jika CB WHPB 7D gagal untuk mengamankan, CB WHPB-DOWN akan menjadi back up sekaligus sebagai pelindung dari bus MCC-WHPB

Dari gambar model single line diagram peralatan eksisting pada tipikal koordinasi 2, terdapat 3 peralatan pengaman yaitu :

1. LVCB WHPB-7D dan rele overload (49) digunakan untuk mengamankan motor AC-WHPB-7D, 480 volt yang memiliki kapasitas 40HP dan mengamankan overload beban yang terjadi pada motor AC-WHPB-7D.

2. LVCB WHPB-DOWN digunakan untuk mengamankan jalur yang menghubungkan dari sekunder trafo ke bus MCC-WHPB dan juga sebagai back up pengaman LVCB WHPB-7D.

Berikut setting pengaman kondisi eksisting yang di dapat dari data sekunder seperti terlihat pada table 4.3 :

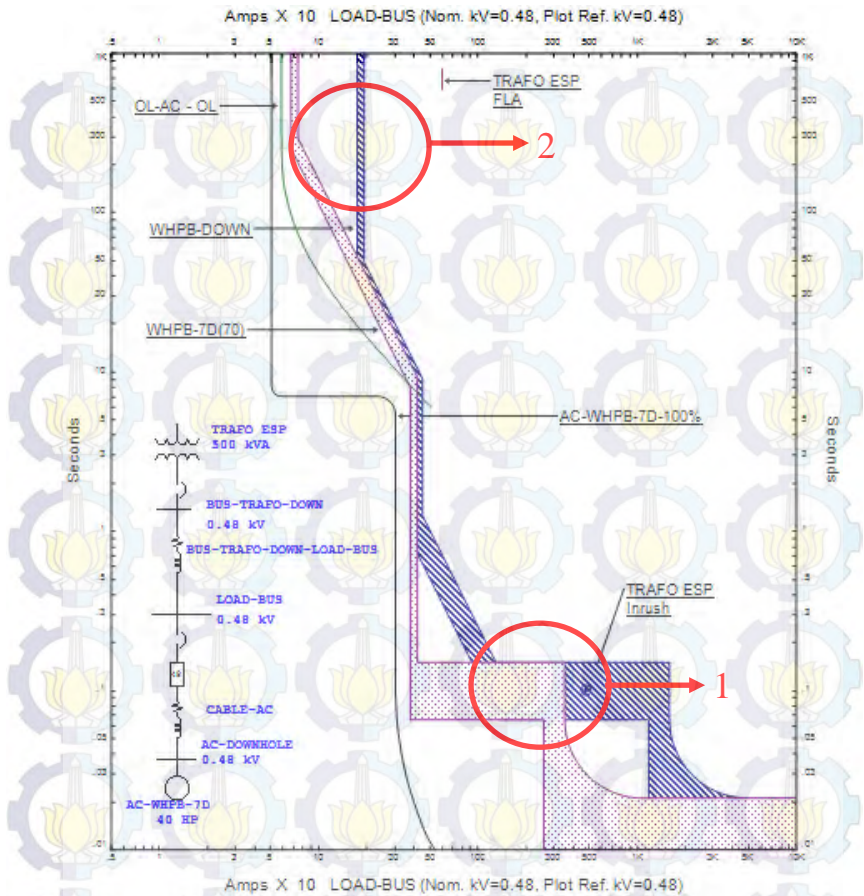
**Tabel 4.3** Setting Pengaman Eksisting Tipikal 2

| ID peralatan pengaman & Model                                    | Setting    |                  |
|--|------------|------------------|
| WHPB-7D(50)<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (I2t) | Sensor     | 125              |
|  | LT Pickup  | 0.48             |
|  | LT Band    | 12               |
|  | ST Pickup  | 6.5              |
|  | ST Band    | 0.1              |
| OL-VSP<br>Model:<br>Siemens<br>3UF50                             | Type       | Class 10         |
|  | Trip Range | 25 – 100 Primary |
|  | Trip       | 49.83            |
|  | Trip Amps  | 49.83            |
| WHPB-DOWN<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (I2t)   | Sensor     | 400              |
|  | LT Pickup  | 0.4              |
|  | LT Band    | 2                |
|  | ST Pickup  | 2.7              |
|  | ST Band    | 0.1              |

Dari data eksisting peralatan pengaman, selanjutnya dilakukan penggambaran kurva kerja peralatan dengan menggunakan paket program dari ETAP 12.6 yaitu peralatan pengaman (*STAR-Protective Device Coordination*). Hal ini dilakukan untuk melihat bagaimana koordinasi pengaman kondisi eksisting pada tipikal 2. Dilakukan pula simulasi *Arc Flash* dan nilai insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan karena koordinasi pengaman kondisi eksisting masih terdapat kesalahan sehingga belum tercapainya sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan tipikal 2.

Hasil dari penggambaran kurva kerja peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 2 dapat dilihat pada gambar 4.5





**Gambar 4.5** Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 2

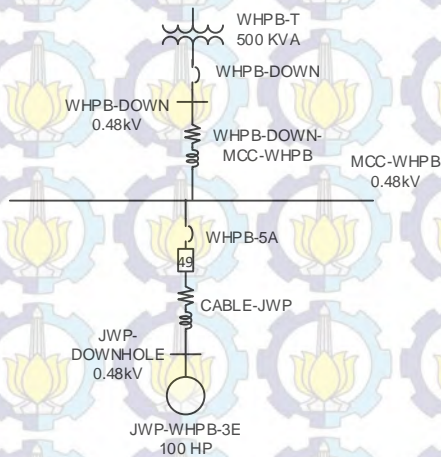
Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu :

1. Setting waktu CB WHPB-7D dan CB WHPB-DOWN di set *trip* dalam time dial yang sama. Akibatnya jika terjadi gangguan hubung singkat di motor AC-WHPB-7D maka semua CB akan bekerja (*trip*) dalam waktu yang bersamaan. Hal ini akan mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan.

2. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN masih berada di bawah nilai dari FLA sekunder trafo sehingga FLA akan diasumsikan sebagai gangguan.

#### 4.3.3 Simulasi pada Tipikal 3

Gambar 4.4 adalah model single diagram peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 3, dimulai dari Trafo WHPB sampai ke motor JWP-WHPB-5A dengan kapasitas 100HP. Pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-WHPB-5A, rele overload (49) dan LVCB-WHPB-DOWN.



**Gambar 4.6** Model Sistem Kelistrikan Tipikal 3

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor JWP-WHPB-5A kapasitas 100HP maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB WHPB 5A. Jika CB WHPB 5A gagal untuk mengamankan, CB WHPB-DOWN akan menjadi back up sekaligus sebagai pelindung dari bus MCC-WHPB

Dari gambar model single line diagram peralatan eksisting pada tipikal koordinasi 2, terdapat 3 peralatan pengaman yaitu :

1. LVCB WHPB-5A dan rele overload (49) digunakan untuk mengamankan motor JWP-WHPB-3E, 480 volt yang memiliki kapasitas 100HP dan mengamankan overload beban yang terjadi pada motor JWP-WHPB-3E.

2. LVCB WHPB-DOWN digunakan untuk mengamankan jalur yang menghubungkan dari sekunder trafo ke bus MCC-WHPB dan juga sebagai back up pengaman LVCB WHPB-5A.

Berikut setting pengaman kondisi eksisting yang di dapat dari data sekunder seperti terlihat pada table 4.4 :

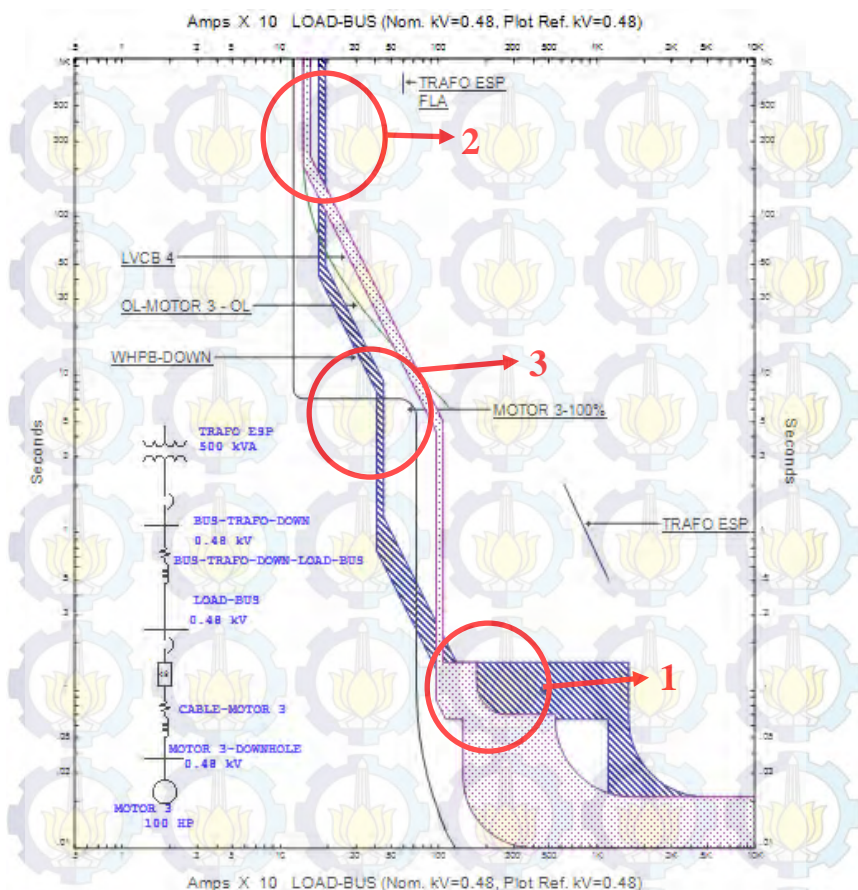
**Tabel 4.4** Setting Pengaman Eksisting Tipikal 3

| ID peralatan pengaman & Model                                    | Setting    |                  |
|--|------------|------------------|
| WHPB-5A(50)<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (12t) | Sensor     | 125              |
|  | LT Pickup  | 0.48             |
|  | LT Band    | 12               |
|  | ST Pickup  | 6.5              |
|  | ST Band    | 0.1              |
| OL-VSP<br>Model:<br>Siemens<br>3UF50                             | Type       | Class 10         |
|  | Trip Range | 25 – 100 Primary |
|  | Trip       | 49.83            |
|  | Trip Amps  | 49.83            |
| WHPB-DOWN<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (12t)   | Sensor     | 400              |
|  | LT Pickup  | 0.4              |
|  | LT Band    | 2                |
|  | ST Pickup  | 2.7              |
|  | ST Band    | 0.1              |

Dari data eksisting peralatan pengaman, selanjutnya dilakukan penggambaran kurva kerja peralatan dengan menggunakan paket program dari ETAP 12.6 yaitu peralatan pengaman (*STAR-Protective Device Coordination*). Hal ini dilakukan untuk melihat bagaimana koordinasi pengaman kondisi eksisting pada tipikal 3. Dilakukan pula simulasi *Arc Flash* dan nilai insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan karena koordinasi pengaman kondisi eksisting masih terdapat kesalahan sehingga belum tercapainya sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan tipikal 3.

Hasil dari penggambaran kurva kerja peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 3 dapat dilihat pada gambar 4.7.





**Gambar 4.7** Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 3

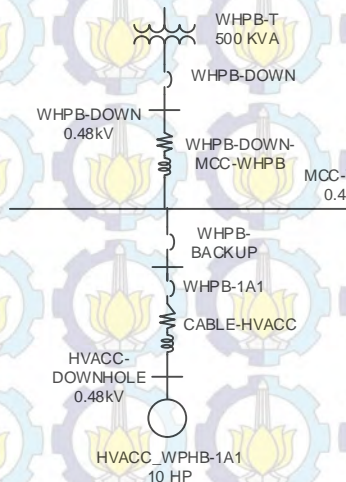
Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu :

1. Setting waktu CB WHPB-5A dan CB WHPB-DOWN di set *trip* dalam time dial yang sama. Akibatnya jika terjadi gangguan hubung singkat di motor JWP-WHPB-3E maka semua CB akan bekerja (*trip*) dalam waktu yang bersamaan. Hal ini akan mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan.

2. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN masih berada di bawah nilai dari FLA sekunder trafo sehingga FLA akan diasumsikan sebagai gangguan.
3. Setting ST Pick Up dan LT Band pada CB WHPB-DOWN masih mengenai kurva dari starting motor.

#### 4.3.4 Simulasi pada Tipikal 4

Gambar 4.4 adalah model single diagram peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 4, dimulai dari Trafo WHPB sampai ke motor HVACC-WHPB-1A1 dengan kapasitas 10HP. Pengaman yang digunakan pada tipikal ini adalah LVCB-WHPB-1A1, LVCB WHPB-BACKUP dan LVCB-WHPB-DOWN.



**Gambar 4.8** Model Sistem Kelistrikan Tipikal 4

Saat terjadi gangguan hubung singkat pada motor HVACC-WHPB-1A1 kapasitas 10HP maka pengaman yang bekerja lebih dahulu adalah CB WHPB-1A1. Jika CB WHPB-1A1 gagal untuk mengamankan, CB WHPB-BACKUP akan menjadi back up sekaligus sebagai pelindung dari bus MCC. Selanjutnya CB WHPB-DOWN berfungsi untuk mengamankan generator dari gangguan sekaligus pengaman bus MCC-WHPB.

Dari gambar model single line diagram peralatan eksisting pada tipikal koordinasi 4, terdapat 3 peralatan pengaman yaitu :

1. LVCB WHPB-1A1 dan LVCB WHPB-BACKUP digunakan untuk mengamankan motor HVACC-WHPB-1A1, 480 volt yang memiliki kapasitas 10HP dan mengamankan bus MCC serta menjadi backup dari LVCB WHPB-1A1.
2. LVCB WHPB-DOWN digunakan untuk mengamankan jalur yang menghubungkan dari sekunder trafo ke bus MCC-WHPB.

Berikut setting pengaman kondisi eksisting yang di dapat dari data sekunder seperti terlihat pada table 4.5 :

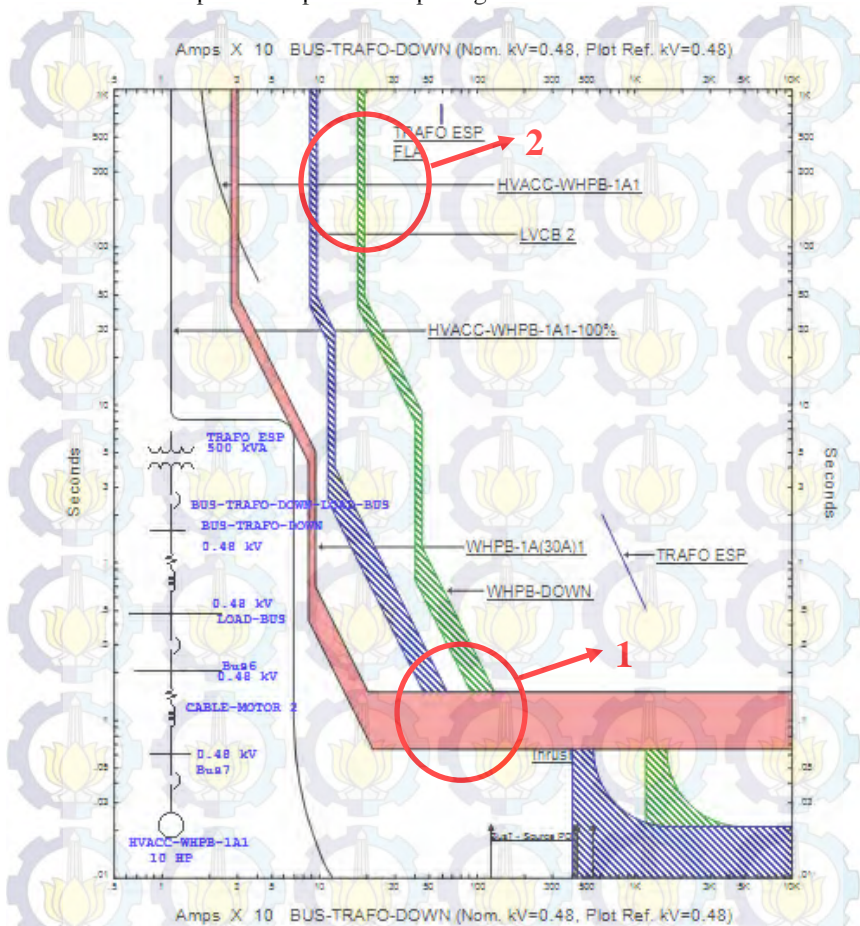
**Tabel 4.5** Setting Pengaman Eksisting Tipikal 4

| ID peralatan pengaman & Model                                     | Setting   |      |
|---|-----------|------|
| WHPB-1A1(50)<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (I2t) | Sensor    | 63   |
|   | LT Pickup | 0.4  |
|   | LT Band   | 2    |
|   | ST Pickup | 63.6 |
|   | ST Band   | 0.1  |
| WHPB-BACKUP<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (I2t)  | Sensor    | 200  |
|   | LT Pickup | 0.4  |
|   | LT Band   | 2    |
|   | ST Pickup | 1.5  |
|   | ST Band   | 0.1  |
| WHPB-DOWN<br>Model:<br>Cutler-Hummer<br>OPTIM 550/1050 K (I2t)    | Sensor    | 400  |
|   | LT Pickup | 0.4  |
|   | LT Band   | 2    |
|   | ST Pickup | 2.7  |
|   | ST Band   | 0.1  |

Dari data eksisting peralatan pengaman, selanjutnya dilakukan penggambaran kurva kerja peralatan dengan menggunakan paket program dari ETAP 12.6 yaitu peralatan pengaman (*STAR-Protective Device Coordination*). Hal ini dilakukan untuk melihat bagaimana koordinasi pengaman kondisi eksisting pada tipikal 4. Dilakukan pula simulasi *Arc Flash* dan nilai insiden energinya kecil. Hal ini diakibatkan karena koordinasi pengaman kondisi eksisting masih terdapat kesalahan sehingga belum tercapainya sistem pengaman yang selektif dan efektif dalam menjaga stabilitas dari sistem kelistrikan tipikal 4.



Hasil dari penggambaran kurva kerja peralatan eksisting pada koordinasi tipikal 4 dapat dilihat pada gambar 4.9



**Gambar 4.9** Kurva Kerja Peralatan Eksisting Tipikal 4

Hasil plot eksisting terdapat tanda lingkaran merah yang menandakan bahwa koordinasi sistem pengaman kurang tepat, yaitu :

1. Setting waktu CB WHPB-1A1, CB WHPB-BACKUP dan CB WHPB-DOWN di set *trip* dalam time dial yang sama. Akibatnya jika terjadi gangguan hubung singkat di motor HVACC-WHPB-1A1

maka semua CB akan bekerja (*trip*) dalam waktu yang bersamaan. Hal ini akan mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan.

2. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN masih berada di bawah nilai dari FLA sekunder trafo sehingga FLA akan diasumsikan sebagai gangguan.

#### 4.4 Simulasi Koordinasi Pengaman dan Arc Flash Kondisi

##### ***Resetting***

*Resetting* perataan pengaman dimaksudkan untuk memperbaiki setting peralatan pengaman sesuai dengan datasheet atau standart yang ada. Sehingga mendapatkan koordinasi pengaman yang selektif. Selanjutnya dilakukan analisa *Arc Flash* menggunakan standar IEEE 1584-2002 untuk menghitung nilai insiden energi *Arc Flash* dan simulasinya menggunakan Software ETAP 12.6.

##### 4.4.1 Simulasi Arc Flash Kondisi *Resetting* pada Tipikal 1

Sebelum melakukan simulasi *Arc Flash*, dilakukan *Resetting* pada LVCB-WHPB-3E dan LVCB-WHPB-DOWN.

##### ❖ **LVCB WHPB-3E**

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| Manufacturer             | : Cutler-Hammer          |
| Model                    | : OPTIM 550/1050 L (12t) |
| FLA motor                | : 28.19 A                |
| Lock Rotor Current (LRC) | : 169.1 A                |
| Isc min VSP DOWNHOLE     | : 1.16 kA (0.48 kV)      |
| Isc max VSP DOWNHOLE     | : 1.48 kA (0.48 kV)      |
| Sensor                   | : 125                    |
| Rating Plug              | : 63                     |

##### **Long Time Pick Up**

$$1.05 \times \text{FLA Motor} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$$

$$1.05 \times 28.19 < \text{Iset} < 1.3 \times 28.19$$

$$29.59 < \text{Iset} < 36.647$$

$$\text{Dipilih Iset} = 31.5 \text{ A}$$

$$\text{LT Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{31.5}{63} = 0.5$$

##### **Long Time Band**

$$\text{Dipilih LT Band} = 8$$

Short Time Pick Up

$$LRC \leq I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$169.1 \leq I_{set} \leq 0.8 \times 1160$$

$$169.1 \leq I_{set} \leq 928$$

Dipilih  $I_{set} = 201.6 \text{ A}$ ,

$$ST \text{ Pick UP} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{201.6}{63} = 3.2$$

Short Time Band

Dipilih  $ST \text{ Band (time delay)} = 0.1 \text{ s}$

❖ **LVCB WHPB-DOWN**

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| Manufacturer            | : Cutler-Hammer          |
| Model                   | : OPTIM 750/1050 L (I2t) |
| FLA sekunder Trafo WHPB | : 601.4 A                |
| Isc min MCC WHPB        | : 4.84 kA (0.48 kV)      |
| Isc max MCC WHPB        | : 6.94 kA (0.48 kV)      |
| Sensor                  | : 800                    |
| Rating Plug             | : 800                    |

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Sekunder Trafo WHPB} < I_{set} < 1.3 \times \text{FLA Sekunder Trafo WHPB}$$

$$1.05 \times 601.4 < I_{set} < 1.3 \times 601.4$$

$$631.47 < I_{set} < 781.82$$

Dipilih  $I_{set} = 640 \text{ A}$

$$LT \text{ Pick UP} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{640}{800} = 0.8$$

Long Time Band

Dipilih  $LT \text{ Band} = 2$

Short Time Pick Up

$$I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc \text{ Min MCC WHPB}}$$

$$I_{set} \leq 0.8 \times 4840$$

$$I_{set} \leq 3872$$

Dipilih  $I_{set} = 960 \text{ A}$ ,

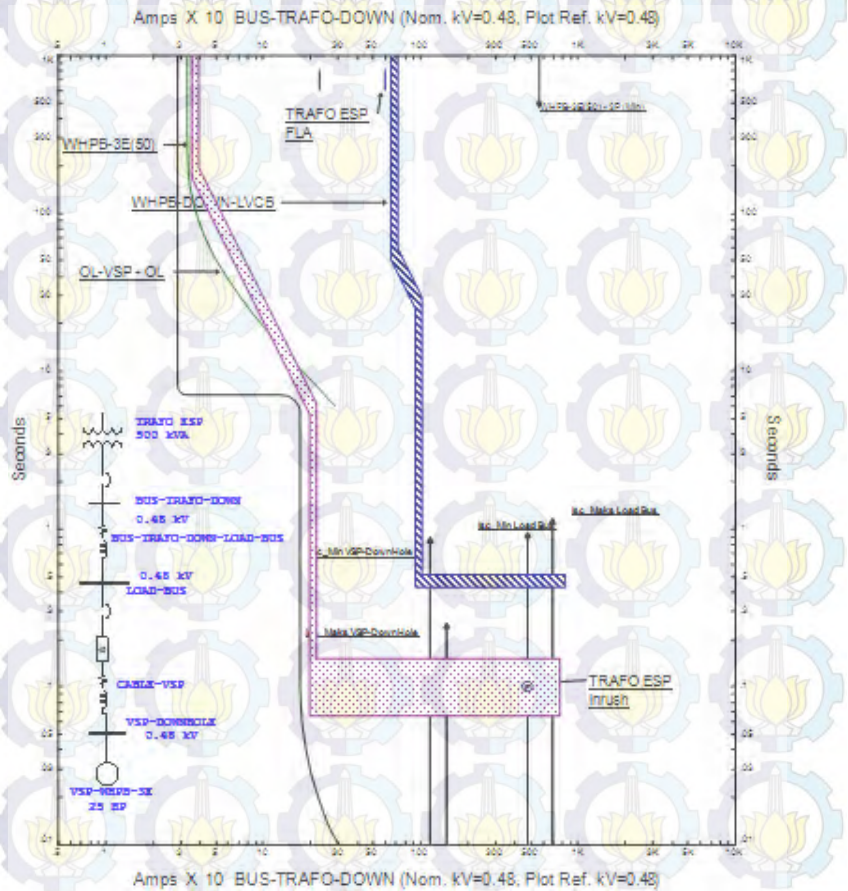


$$\text{ST Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{960}{800} = 1.2$$

### Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.5s

Berikut gambar kurva koordinasi pengaman pada tipikal 1 setelah dilakukan *resetting*



**Gambar 4.10** Kurva Kerja Peralatan *Resetting* Tipikal 1

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa setting waktu CB WHPB-3E dan CB WHPB-DOWN di set dalam time dial yang berbeda. Ini dimaksudkan untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN sudah berada diatas dari nilai FLA sekunder trafo. Sehingga FLA tidak akan diasumsikan sebagai gangguan. Setelah memenuhi koordinasi pengaman yang benar lalu dilakukan simulasi *Arc Flash* pada tipikal 1.

Hasil dari simulasi *Arc Flash* setelah *resetting* adalah sebagai berikut seperti terlihat table 4.6

**Tabel 4.6** Hasil Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 1

| Tipikal 1                       |             |         |  |                      |                                |
|---------------------------------|-------------|---------|--|----------------------|--------------------------------|
| ID                              | Type Bus    | Ia (kA) | Incident Energi (cal/cm <sup>2</sup> ) | Hazard Risk Category | Flash Protection Boundary (ft) |
| Load Terminal Motor VSP-WHPB-3E | Cable bus   | 1.284   | 0.583                                  | 0                    | 1.045                          |
| Bus MCC-WHPB                    | Switch gear | 4.648   | 4.695                                  | 2                    | 5.049                          |

#### 4.4.2 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 1

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada tipikal 1 dengan perhitungan sebagai berikut :

##### ❖ Load Terminal Motor VSP-WHPB-3E

Mencari Ia (Arching Current) :

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg .Ibf + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V \\ (\lg .Ibf) - 0,00304 G (\lg .Ibf)$$

$$= \{-0,097 + 0,662 \lg (Ibf) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 \\ + 0,5588 \times 0,48 \lg (Ibf) - 0,00304 \times 13 \lg (Ibf)\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (1.482) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (1.482) - 0.00304 \times 13 \lg (1.482)\}$$

$$= 0.108$$

$$I_a = 1.283 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$En = 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G}$$

$$= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.108+0.0011 \times 13}$$

$$= 0.29$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4.184 \times 1.5 \times 0.29 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right)$$

$$= 2.453 \text{ J/cm}^2 \times 0.24$$

$$= 0.588 \text{ cal/cm}^2$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 0 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$D_B = \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4.184 \times 1.5 \times 0.29 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 318.72 \text{ mm} = 0.318 \text{ m}$$

$$= 1.0433 \text{ ft}$$

#### ❖ Bus MCC-WHPB

Mencari  $I_a$  (Arching Current) :

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg .I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V$$

$$(\lg .I_{bf}) - 0.00304 G (\lg .I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 32$$

$$+ 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 32 \lg (I_{bf})\}$$



$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (6.945) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 32 + 0.5588 \times 0.48 \lg (6.945) - 0.00304 \times 32 \lg (6.945)\}$$

$$= 0.667$$

$$I_a = 4.648 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$En = 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G}$$

$$= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.667+0.0011 \times 32}$$

$$= 1.17$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4.184 \times 1.5 \times 1.17 \times \left( \frac{0.51}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.473}}{610^{1.473}} \right)$$

$$= 18.724 \text{ J/cm}^2 \times 0.24$$

$$= 4.4938 \text{ cal/cm}^2$$

Jarak kerja : 24 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$D_B = \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 1.17 \times \left( \frac{0.51}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.473}}$$

$$= 1494.96 \text{ mm} = 1.494 \text{ m}$$

$$= 4.901 \text{ ft}$$

#### 4.4.3 Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* pada Tipikal 2

Sebelum melakukan simulasi *Arc Flash*, dilakukan *Resetting* pada LVCB-WHPB-7D. LVCB WHPB-DOWN sudah disetting pada tipikal 1

##### ❖ LVCB WHPB-7D

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| Manufacturer             | : Cutler-Hammer          |
| Model                    | : OPTIM 550/1050 L (I2t) |
| FLA motor                | : 49.83 A                |
| Lock Rotor Current (LRC) | : 298.98 A               |
| Isc min AC DOWNHOLE      | : 1.16 kA (0.48 kV)      |

Isc max AC DOWNHOLE : 1.55 kA (0.48 kV)

Sensor : 125

Rating Plug : 63

Long Time Pick Up

$1.05 \times \text{FLA Motor} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$

$1.05 \times 49.83 < \text{Iset} < 1.3 \times 49.83$

$52.32 < \text{Iset} < 64.77$

Dipilih Iset = 54.18 A

$$\text{LT Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{54.18}{63} = 0.86$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 8.7

Short Time Pick Up

$\text{LRC} \leq \text{Iset} \leq 0.8 \times \text{Isc Min}$

$298.98 \leq \text{Iset} \leq 0.8 \times 1160$

$298.98 \leq \text{Iset} \leq 928$

Dipilih Iset = 340.2 A

$$\text{ST Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{340.2}{63} = 5.4$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.1s

❖ **LVCB WHPB-DOWN**

Manufacturer : Cutler-Hammer

Model : OPTIM 750/1050 L (I2t)

FLA sekunder Trafo WHPB : 601.4 A

Isc min MCC WHPB : 4.84 kA (0.48 kV)

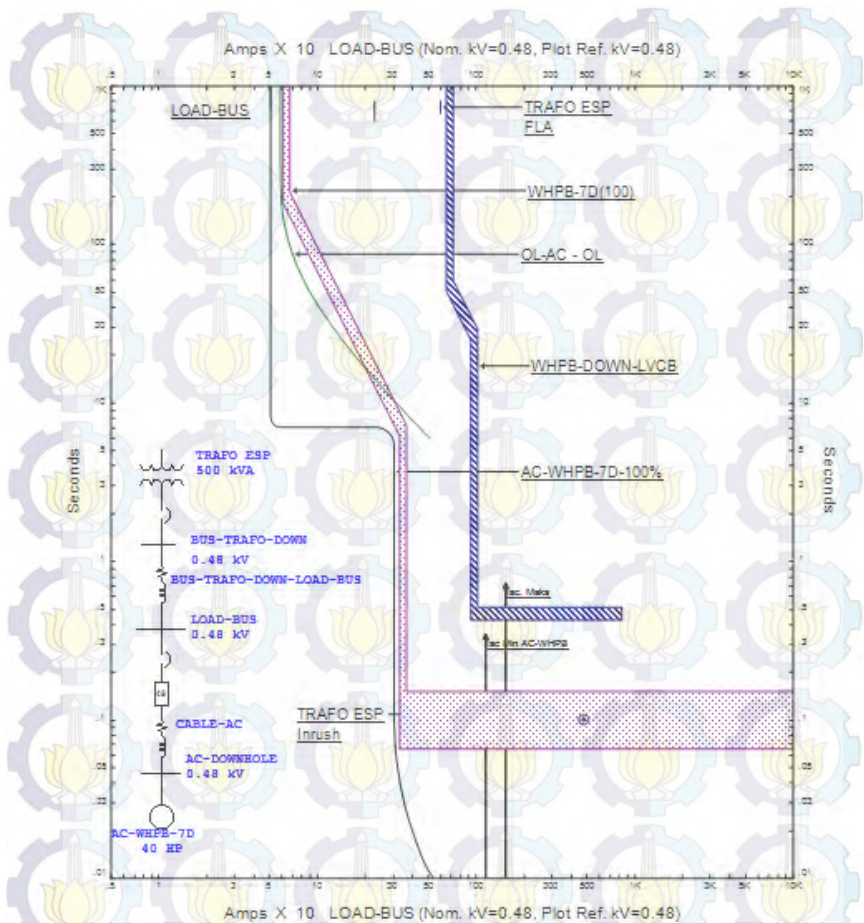
Isc max MCC WHPB : 6.94 kA (0.48 kV)

Sensor : 800

Rating Plug : 800

Setting pada LVCB WHPB DOWN sudah dilakukan pada tipikal

1. Berikut gambar kurva koordinasi pengaman pada tipikal 2 setelah dilakukan *resetting*



**Gambar 4.11** Kurva Kerja Peralatan *Resetting* Tipikal 2

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa setting waktu CB WHPB-7D dan CB WHPB-DOWN di set dalam time dial yang berbeda. Ini dimaksudkan untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN sudah berada diatas dari nilai FLA sekunder trafo. Sehingga



FLA tidak akan diasumsikan sebagai gangguan. Setelah memenuhi koordinasi pengaman yang benar lalu dilakukan simulasi *Arc Flash* pada tipikal 2.

Hasil dari simulasi *Arc Flash* setelah *resetting* adalah sebagai berikut seperti terlihat table 4.7

**Tabel 4.7** Hasil Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 2

| <b>Tipikal 2</b>               |                 |                |   |                             |                                       |
|--------------------------------|-----------------|----------------|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| <b>ID</b>                      | <b>Type Bus</b> | <b>Ia (kA)</b> | <b>Incident Energi (cal/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Hazard Risk Category</b> | <b>Flash Protection Boundary (ft)</b> |
| Load Terminal Motor AC-WHPB-7D | Cable bus       | 1.333          | 0.607                                       | 0                           | 1.066                                 |
| Bus MCC-WHPB                   | Switch gear     | 4.648          | 4.695                                       | 2                           | 5.049                                 |

#### 4.4.4 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 2

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada tipikal 2 dengan perhitungan sebagai berikut :

##### ❖ Load Terminal Motor VSP-WHPB-7D

Mencari Ia (Arching Current) :

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V \\ (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0,097 + 0,662 \lg (I_{bf}) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 \\ + 0,5588 \times 0,48 \lg (I_{bf}) - 0,00304 \times 13 \lg (I_{bf})\} \\ = \{-0,097 + 0,662 \lg (1,546) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times \\ 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (1,546) - 0,00304 \times 13 \lg (1,546)\} \\ = 0,125$$

$$Ia = 1.333 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.125+0.0011 \times 13} \\ &= 0.30 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 \times 1.5 \times 0.30 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right) \\ &= 2.538 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 0.609 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 0 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 0.3 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 324.17 \text{ mm} = 0.324 \text{ m} \\ &= 1.062 \text{ ft} \end{aligned}$$

#### ❖ **Bus MCC-WHPB**

Perhitungan manual pada bus MCC-WHPB sama dengan tipikal 1.

#### 4.4.5 Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* pada Tipikal 3

Sebelum melakukan simulasi *Arc Flash*, dilakukan *Resetting* pada LVCB-WHPB-5A dan LVCB-WHPB-DOWN.

#### ❖ **LVCB WHPB-5A**

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| Manufacturer             | : Cutler-Hammer          |
| Model                    | : OPTIM 750/1050 L (I2t) |
| FLA motor                | : 118.8 A                |
| Lock Rotor Current (LRC) | : 721.8 A                |
| Isc min JWP DOWNHOLE     | : 1.16 kA (0.48 kV)      |
| Isc max JWP DOWNHOLE     | : 1.89 kA (0.48 kV)      |
| Sensor                   | : 200                    |
| Rating Plug              | : 200                    |

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Motor} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$$

$$1.05 \times 118.8 < \text{Iset} < 1.3 \times 118.8$$

$$124.74 < \text{Iset} < 154.44$$

Dipilih Iset = 126 A

$$\text{LT Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{126}{200} = 0.63$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 9.3

Short Time Pick Up

$$\text{LRC} \leq \text{Iset} \leq 0.8 \times \text{Isc Min}$$

$$721.8 \leq \text{Iset} \leq 0.8 \times 1160$$

$$721.8 \leq \text{Iset} \leq 928$$

Dipilih Iset = 860 A

$$\text{ST Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{860}{200} = 4.3$$

Short Time Band

Dipilih ST Band (time delay) = 0.1s

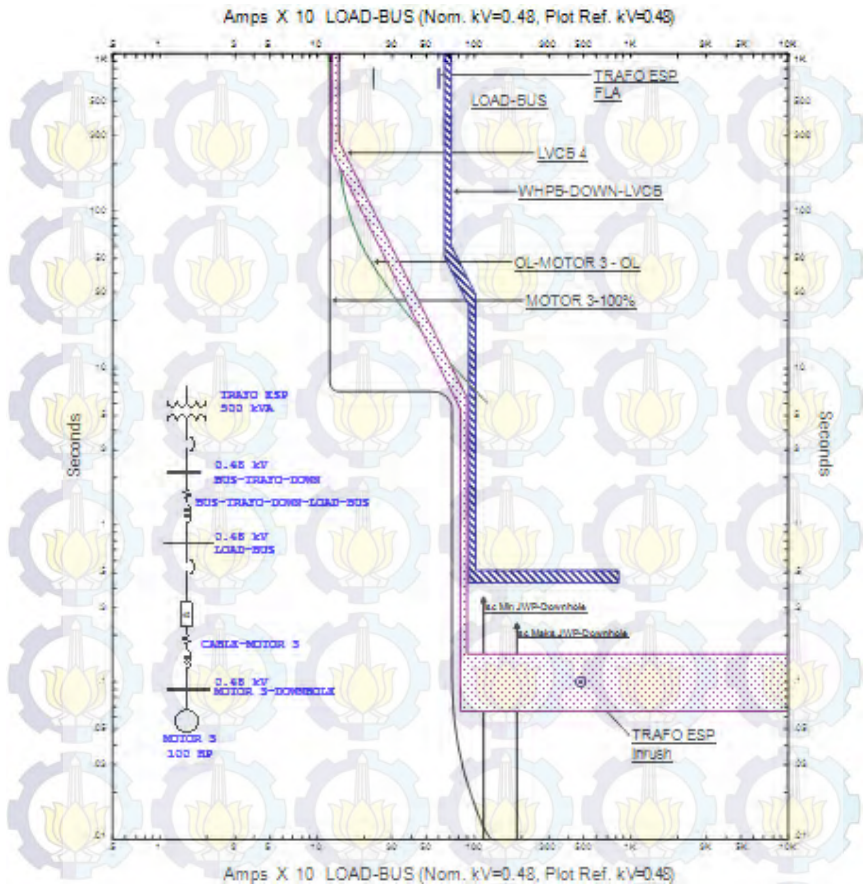
❖ **LVCB WHPB-DOWN**

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| Manufacturer            | : Cutler-Hammer          |
| Model                   | : OPTIM 750/1050 L (I2t) |
| FLA sekunder Trafo WHPB | : 601.4 A                |
| Isc min MCC WHPB        | : 4.84 kA (0.48 kV)      |
| Isc max MCC WHPB        | : 6.94 kA (0.48 kV)      |
| Sensor                  | : 800                    |
| Rating Plug             | : 800                    |

Setting pada LVCB WHPB DOWN sudah dilakukan pada tipikal

1. Berikut gambar kurva koordinasi pengaman pada tipikal 3 setelah dilakukan *resetting*





**Gambar 4.12** Kurva Kerja Peralatan *Resetting* Tipikal 3

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa setting waktu CB WHPB-5A dan CB WHPB-DOWN di set dalam time dial yang berbeda. Ini dimaksudkan untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN sudah berada diatas dari nilai FLA sekunder trafo. Sehingga FLA tidak akan diasumsikan sebagai gangguan. Setelah memenuhi koordinasi pengaman yang benar lalu dilakukan simulasi *Arc Flash* pada tipikal 3.

Hasil dari simulasi *Arc Flash* setelah *resetting* adalah sebagai berikut seperti terlihat table 4.8

**Tabel 4.8** Hasil Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 3

| <b>Tipikal 3</b>                |                 |                |   |                             |                                       |
|---------------------------------|-----------------|----------------|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| <b>ID</b>                       | <b>Type Bus</b> | <b>Ia (kA)</b> | <b>Incident Energi (cal/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Hazard Risk Category</b> | <b>Flash Protection Boundary (ft)</b> |
| Load Terminal Motor JWP-WHPB-5A | Cable bus       | 1.596          | 0.737                                       | 0                           | 1.175                                 |
| Bus MCC-WHPB                    | Switch gear     | 4.648          | 4.695                                       | 2                           | 5.049                                 |

#### 4.4.6 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 3

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada tipikal 3 dengan perhitungan sebagai berikut :

##### ❖ Load Terminal Motor VSP-WHPB-7D

Mencari Ia (Arching Current) :

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\begin{aligned} &= \{-0,097 + 0,662 \lg (I_{bf}) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 \\ &\quad + 0,5588 \times 0,48 \lg (I_{bf}) - 0,00304 \times 13 \lg (I_{bf})\} \\ &= \{-0,097 + 0,662 \lg (1,892) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times \\ &\quad 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (1,892) - 0,00304 \times 13 \lg (1,892)\} \\ &= 0,202 \end{aligned}$$

$$Ia = 1,595 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned} En &= 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia)+0,0011G} \\ &= 10^{-0,555-0,113+1,081 \times 0,202+0,0011 \times 13} \\ &= 0,367 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 \times 1.5 \times 0.367 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right) \\ &= 3.105 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 0.74 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 0 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 0.367 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 358.55 \text{ mm} = 0.358 \text{ m} \\ &= 1.175 \text{ ft} \end{aligned}$$

#### ❖ **Bus MCC-WHPB**

Perhitungan manual pada bus MCC-WHPB sama dengan tipikal 1.

#### 4.4.7 Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* pada Tipikal 4

Sebelum melakukan simulasi *Arc Flash*, dilakukan *Resetting* pada LVCB-WHPB-1A1, LVCB-WHPB-DOWN dan LVCB-WHPB-DOWN.

#### ❖ **LVCB WHPB-1A1**

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| Manufacturer             | : Cutler-Hammer          |
| Model                    | : OPTIM 550/1050 L (I2t) |
| FLA motor                | : 11.28 A                |
| Lock Rotor Current (LRC) | : 67.68 A                |
| Isc min HVACC DOWNHOLE   | : 4.8 kA (0.48 kV)       |
| Isc max HVACC DOWNHOLE   | : 6.87 kA (0.48 kV)      |
| Sensor                   | : 125                    |
| Rating Plug              | : 63                     |



Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Motor} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$$

$$1.05 \times 11.28 < \text{Iset} < 1.3 \times 11.28$$

$$11.84 < \text{Iset} < 14.664$$

$$\text{Dipilih Iset} = 12.6 \text{ A}$$

$$\text{LT Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{12.6}{63} = 0.2$$

Long Time Band

$$\text{Dipilih LT Band} = 9.9$$

Short Time Pick Up

$$\text{LRC} \leq \text{Iset} \leq 0.8 \times \text{Isc Min}$$

$$67.68 \leq \text{Iset} \leq 0.8 \times 4800$$

$$67.68 \leq \text{Iset} \leq 4800$$

$$\text{Dipilih Iset} = 94.5 \text{ A}$$

$$\text{ST Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{80.64}{63} = 1.5$$

Short Time Band

$$\text{Dipilih ST Band (time delay)} = 0.1 \text{ s}$$

❖ **LVCB WHPB-BACKUP**

Manufacturer : Cutler-Hammer

Model : OPTIM 550/1050 L (I2t)

Isc min MCC WHPB-BACKUP : 4.84 kA (0.48 kV)

Isc max MCC WHPB-BACKUP : 6.94 kA (0.48 kV)

Sensor : 125

Rating Plug : 63

Long Time Pick Up

$$1.05 \times \text{FLA Motor} < \text{Iset} < 1.3 \times \text{FLA Motor}$$

$$1.05 \times 20.3 < \text{Iset} < 1.3 \times 20.3$$

$$21.315 < \text{Iset} < 26.39$$

$$\text{Dipilih Iset} = 21.42 \text{ A}$$

$$\text{LT Pick UP} = \frac{\text{Iset}}{\text{Rating Plug}} = \frac{21.42}{63} = 0.34$$

Long Time Band

Dipilih LT Band = 10

Short Time Pick Up

$$LRC \leq I_{set} \leq 0.8 \times I_{sc \text{ Min}}$$

$$67.68 \leq I_{set} \leq 0.8 \times 4800$$

$$67.68 \leq I_{set} \leq 4800$$

Dipilih Iset = 144.9 A

$$ST \text{ Pick UP} = \frac{I_{set}}{\text{Rating Plug}} = \frac{144.9}{63} = 2.3$$

Short Time Band

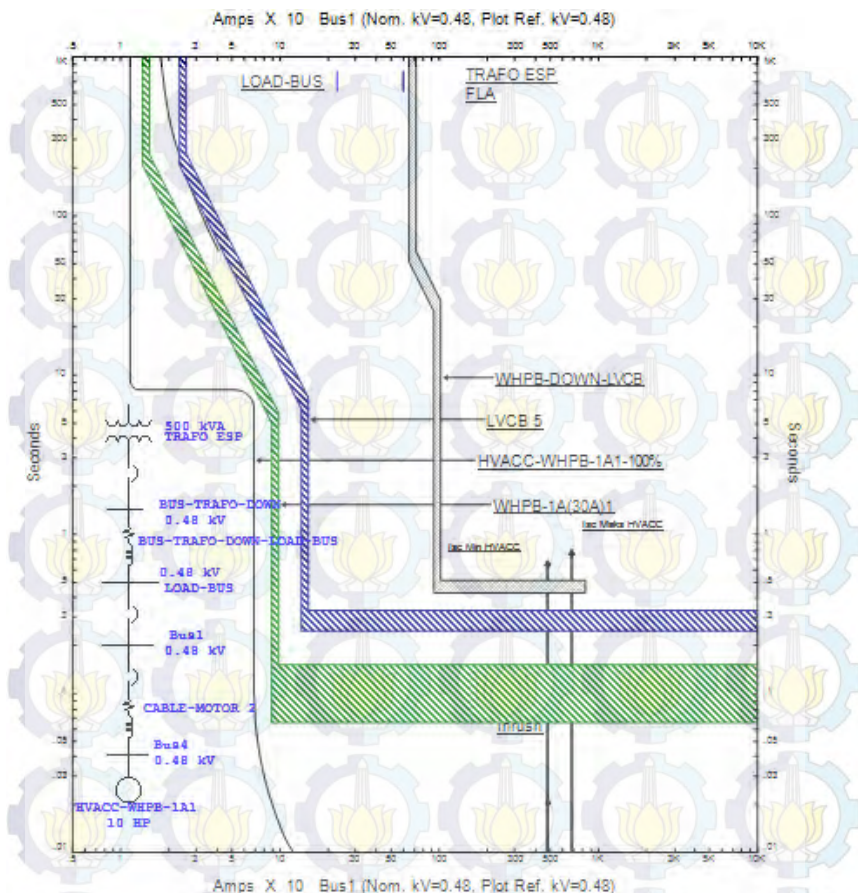
Dipilih ST Band (time delay) = 0.3s

❖ **LVCB WHPB-DOWN**

|                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| Manufacturer            | : Cutler-Hammer          |
| Model                   | : OPTIM 750/1050 L (I2t) |
| FLA sekunder Trafo WHPB | : 601.4 A                |
| Isc min MCC WHPB        | : 4.84 kA (0.48 kV)      |
| Isc max MCC WHPB        | : 6.94 kA (0.48 kV)      |
| Sensor                  | : 800                    |
| Rating Plug             | : 800                    |

Setting pada LVCB WHPB DOWN sudah dilakukan pada tipikal

1. Berikut gambar kurva koordinasi pengaman pada tipikal 4 setelah dilakukan *resetting*



**Gambar 4.13** Kurva Kerja Peralatan *Resetting* Tipikal 4

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa setting waktu CB WHPB-1A1, CB WHPB-BACKUP dan CB WHPB-DOWN di set dalam time dial yang berbeda. Ini dimaksudkan untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya ke beban lain yang tidak mengalami gangguan. Setting LT Pick Up pada CB WHPB-DOWN sudah berada diatas dari nilai FLA sekunder trafo. Sehingga FLA tidak akan diasumsikan sebagai gangguan. Setelah memenuhi koordinasi pengaman yang benar lalu dilakukan simulasi *Arc Flash* pada tipikal 4.



Hasil dari simulasi *Arc Flash* setelah *resetting* adalah sebagai berikut seperti terlihat table 4.9

**Tabel 4.9** Hasil Simulasi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 4

| <b>Tipikal 4</b>                   |                 |                |   |                             |                                       |
|------------------------------------|-----------------|----------------|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| <b>ID</b>                          | <b>Type Bus</b> | <b>Ia (kA)</b> | <b>Incident Energi (cal/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Hazard Risk Category</b> | <b>Flash Protection Boundary (ft)</b> |
| Load Terminal Motor HVACC-WHPB-1A1 | Cable bus       | 5.031          | 2.55  | 1                           | 2.186                                 |
| Bus MCC-WHPB-BACKUP                | MCC             | 4.803          | 4.959                                       | 2                           | 3.56                                  |
| Bus MCC-WHPB                       | Switch gear     | 4.648          | 4.695                                       | 2                           | 5.049                                 |

#### 4.4.8 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Kondisi *Resetting* Tipikal 4

Untuk perhitungan manual menggunakan Standar IEEE 1584-2002 pada tipikal 4 dengan perhitungan sebagai berikut :

##### ❖ Load Terminal Motor HVACC-WHPB-1A1

Mencari Ia (Arching Current) :

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0,097 + 0,662 \lg (I_{bf}) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (I_{bf}) - 0,00304 \times 13 \lg (I_{bf})\}$$

$$= \{-0,097 + 0,662 \lg (6,87) + 0,0966 \times 0,48 + 0,000526 \times 13 + 0,5588 \times 0,48 \lg (6,87) - 0,00304 \times 13 \lg (6,87)\}$$

$$= 0,701$$

$$Ia = 5.031 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned} En &= 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.701+0.0011 \times 13} \\ &= 1.27 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 \times 1.5 \times 1.27 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right) \\ &= 10.74 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 2.57 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 1 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 1.27 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 666.98 \text{ mm} = 0.666 \text{ m} \\ &= 2.185 \text{ ft} \end{aligned}$$

#### ❖ Load Terminal Motor HVACC-WHPB-BACKUP

Mencari Ia (Arching Current) :

$$\begin{aligned} \lg Ia &= K + 0.662 \lg .Ibf + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \\ &\quad (\lg .Ibf) - 0.00304 G (\lg .Ibf) \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (Ibf) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 \\ &\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (Ibf) - 0.00304 \times 25 \lg (Ibf)\} \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (6.945) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (6.945) - 0.00304 \times 25 \lg (6.945)\} \\ &= 0.681 \end{aligned}$$

$$Ia = 4.083 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energy Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081\log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081\times0.681+0.0011\times25} \\ &= 1.25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \\ E &= 4.184 \times 1.5 \times 1.25 \times \left( \frac{0.33}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right) \\ &= 20.941 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 5.02 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 2 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 1.25 \times \left( \frac{0.33}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}} \\ &= 1089.1 \text{ mm} = 1.089 \text{ m} \\ &= 3.573 \text{ ft} \end{aligned}$$

#### ❖ Bus MCC-WHPB

Perhitungan manual pada bus MCC-WHPB sama dengan tipikal 1.

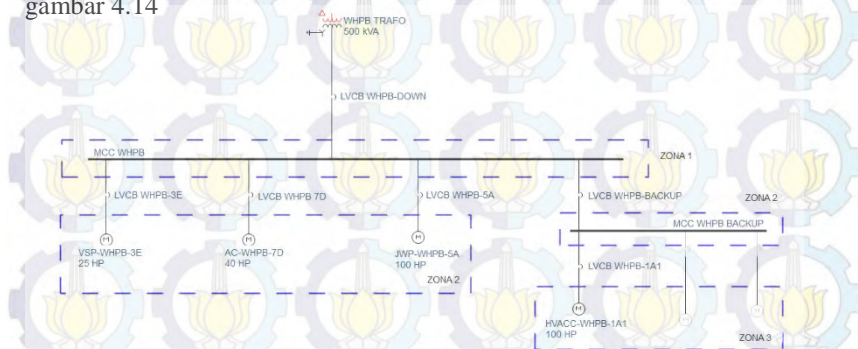
### 4.5 Simulasi Pengurangan Insiden Energi Arc Flash dengan Teknik *Zone Selective Interlocking*

Data dari simulasi Arch Flash pada kondisi *resetting* menunjukkan insiden energi Arc Flash dirasa masih berbahaya terhadap pekerja dan peralatan. Untuk mengurangi insiden energi yang terjadi dipilih metode *Zone Selective Interlocking*. Simulasi dan pengujian teknik *Zone Selective Interlocking* dilakukan menggunakan Software *Easy Power* 9.7. Pemodelan dilakukan di tipikal 1 – 4.



#### 4.5.1 Simulasi Pengurangan Insiden Energi Arch Flash dengan Teknik *Zone Selective Interlocking* pada Tipikal 1 - 4

Selanjutnya akan dilakukan pemodelan Tipikal 1 – 4 pada software *Easy Power* yang terbagi menjadi 3 level zona gangguan. Setting pengaman pada simulasi ini sama dengan kondisi *resetting* tujuannya mensimulasikan dan mengetahui besar pengurangan insiden energi *Arc Flash* dengan teknik *Zone Selective Interlocking* seperti terlihat pada gambar 4.14

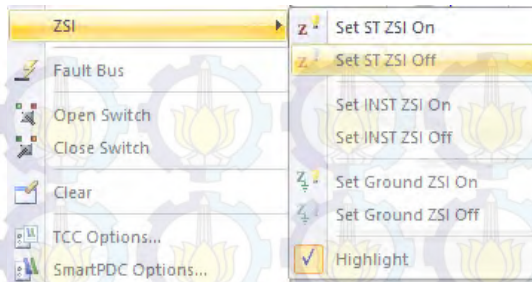


**Gambar 4.14** *Single Line Diagram* Tipikal 1 – 4 pada *Easy Power*

Untuk dapat menguji kapabilitas dari teknik *Zone Selective Interlocking*, akan dilakukan simulasi gangguan pada 6 kondisi yaitu :

1. Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor HVACC-WHPB-1A1
2. Kondisi 2 saat terjadi gangguan pada bus MCC WHPB-BACKUP
3. Kondisi 3 saat terjadi gangguan pada bus MCC-WHPB
4. Kondisi 4 saat terjadi gangguan pada beban motor VSP-WHPB-3E
5. Kondisi 5 saat terjadi gangguan pada beban motor AC-WHPB-7D
6. Kondisi 6 saat terjadi gangguan pada beban motor JWP-WHPB-5A

Selanjutnya teknik ZSI diaktifkan untuk mengetahui pengurangan besarnya insiden energi *Arc Flash* yang terjadi. Sebelumnya dilakukan pemodelan pada *trip device/trip unit* yang memiliki kapasitas untuk melakukan teknik ZSI. *Trip device* yang digunakan pada plant ini adalah *Trip device* culter hammer. Untuk itu, kapasitas dan waktu *trip* ZSI disesuaikan dengan manufacture dari *trip device* culter hammer yaitu optim 550/1050. Untuk mengaktifkan kerja ZSI pada software *Easy Power* 9.7 dapat dilihat pada gambar 4.15

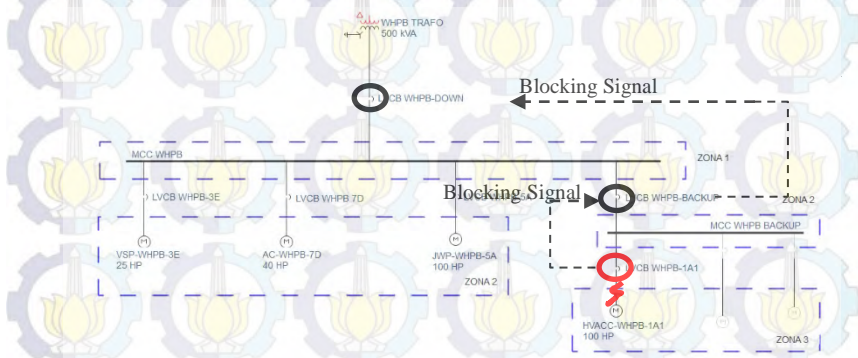


**Gambar 4.15** Fitur ZSI pada *Easy Power*

Sesuai dengan prinsip kerja ZSI bahwa keputusan untuk *trip* dengan atau tanpa delay tergantung pada lokasi gangguan dan blocking signal dimana saat terjadi gangguan maka CB yang merasakan akan mengirim sinyal blocking kepada CB atasnya untuk menahan waktu ZSInya serta mengaktifkan preset time delaynya, sedangkan CB yang merasakan gangguan tidak menerima sinyal blocking akan *trip* tanpa delay sesuai waktu ZSI. Sehingga semakin cepat CB bekerja maka insiden energi *Arc Flash* akan semakin kecil dan dapat meminimalisir bahaya bagi pekerja serta peralatan

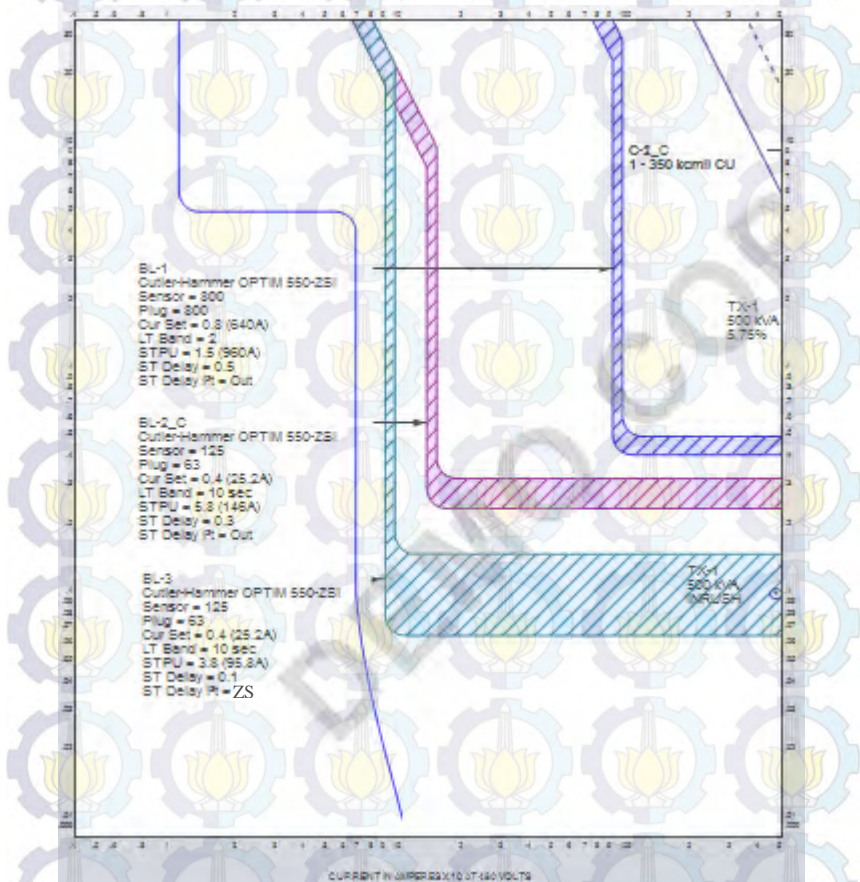
a) Gangguan pada Kondisi 1

Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor HVACC-WHPB-1A1 seperti terlihat pada gambar 4.16



**Gambar 4.16** Gangguan pada Kondisi 1

Kondisi 1 adalah saat terjadi gangguan pada zona 3 di sisi terminal beban motor HVACC-WHPB-1A1, maka terdapat 3 CB pada level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan, yakni LVCB WHPB-1A1, LVCB WHPB-BACKUP dan LVCB WHPB-DOWN. Berikut kurva TCC *Easy Power* saat gangguan kondisi 1.



Gambar 4.17 TCC pada *Easy Power* Saat Gangguan Kondisi 1

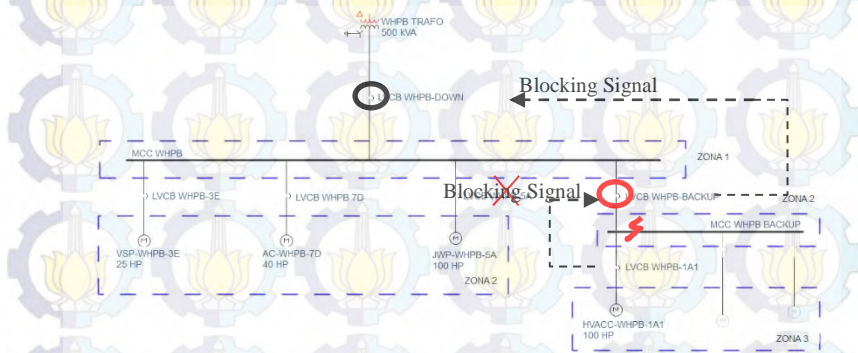


LVCB WHPB-1A1 mengirim sinyal blocking kepada LVCB WHPB-BACKUP untuk menahan waktu *trip* ZSI LVCB WHPB-BACKUP sehingga LVCB WHPB-BACKUP menjadi backup LVCB WHPB-1A1 dengan delay time sebesar 0.3 detik. Dalam waktu yang bersamaan juga LVCB WHPB-BACKUP mengirim sinyal blocking kepada LVCB atasnya LVCB WHPB-DOWN untuk menahan waktu *trip* ZSI LVCB WHPB-DOWN sehingga LVCB WHPB-DOWN juga menjadi back up dengan delay time yang lebih lama sebesar 0.5 detik.

LVCB WHPB-1A1 karena merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal blocking dari LVCB lain, maka LVCB WHPB-1A1 *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* culter hammer.

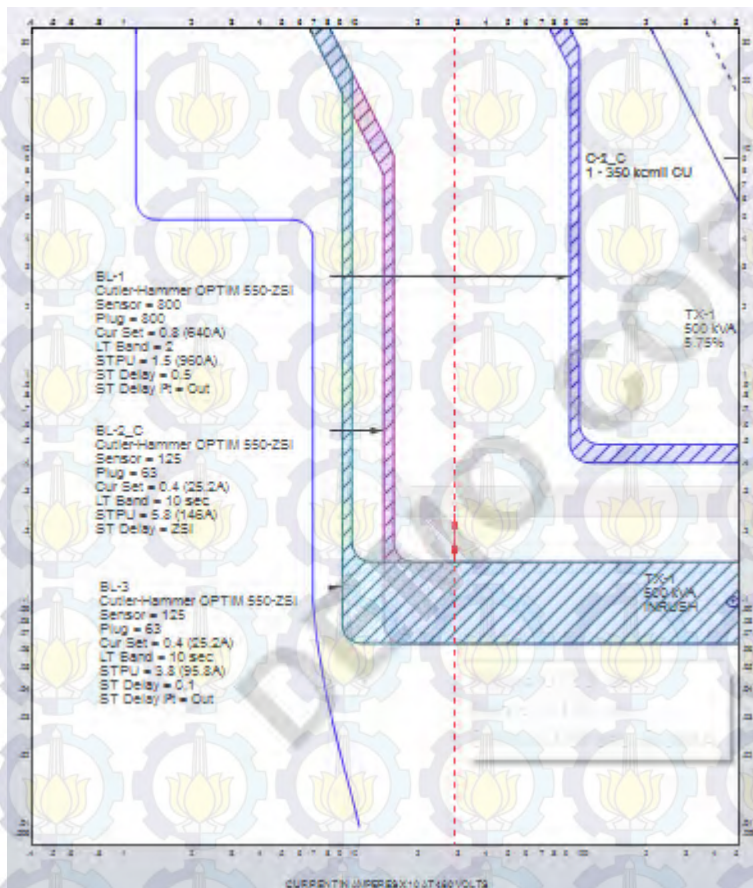
b) Gangguan pada Kondisi 2

Kondisi 2 adalah saat terjadi gangguan pada bus MCC WHPB-BACKUP seperti terlihat pada gambar 4.16



**Gambar 4.18** Gangguan pada Kondisi 2

Kondisi 2 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 di bus MCC WHPB-BUCKUP, maka terdapat 2 CB pada level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan, yakni LVCB WHPB-BACKUP dan LVCB WHPB-DOWN. Berikut kurva TCC *Easy Power* saat gangguan kondisi 2.



**Gambar 4.19** TCC pada *Easy Power* Saat Gangguan Kondisi 2

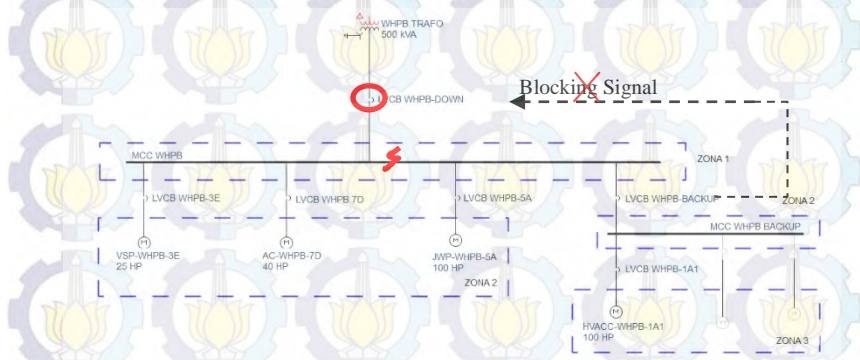
LVCB WHPB-BACKUP mengirim sinyal blocking kepada LVCB WHPB-DOWN untuk menahan waktu *trip* ZSI LVCB WHPB-DOWN sehingga LVCB WHPB-DOWN menjadi backup LVCB WHPB-BACKUP dengan delay time sebesar 0.5 detik. Sedangkan LVCB WHPB-1A1 yang tidak merasakan gangguan pada daerah pengamannya pada zona 3, tidak mengirimkan sinyal blocking kepada LVCB WHPB-BACKUP. Karena LVCB WHPB-BACKUP merasakan gangguan

namun tidak mendapat sinyal blocking dari CB lain, maka LVCB WHPB-BACKUP *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* culter-hammer

LVCB WHPB-BACKUP *trip* dengan waktu ZSI dan terjadi perubahan kurva pengaman dari LVCB WHPB-BACKUP dimana selisih perubahannya sebesar 0.089 detik dari kurva awalnya sebelum menggunakan metode ZSI pada gangguan kondisi 2.

c) Gangguan pada Kondisi 3

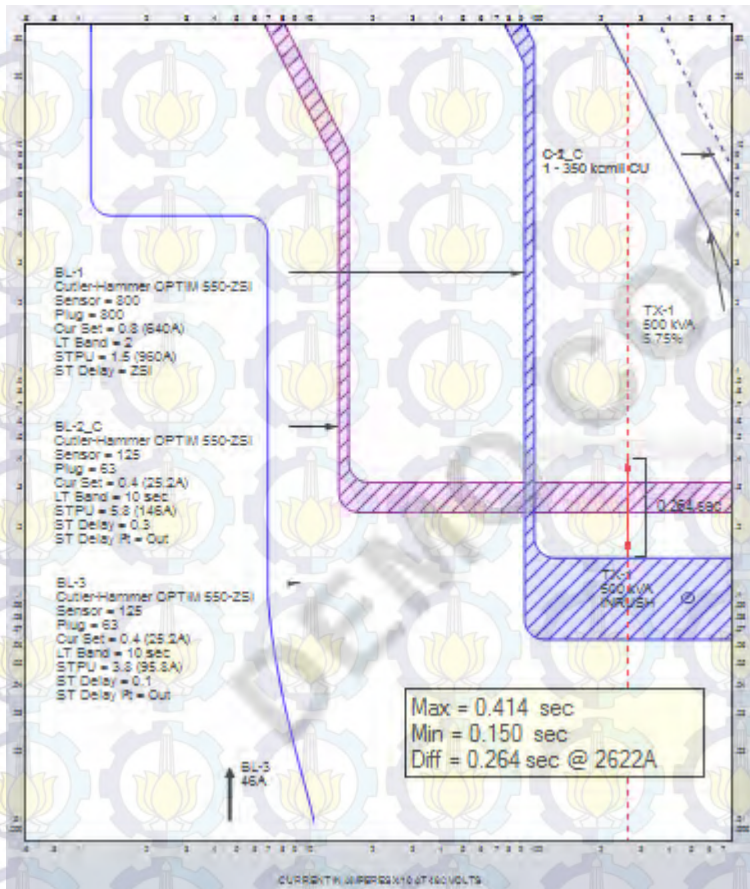
Kondisi 3 adalah saat terjadi gangguan pada bus MCC WHPB seperti terlihat pada gambar 4.16



**Gambar 4.20** Gangguan pada Kondisi 3

Kondisi 3 adalah saat terjadi gangguan pada zona 1 di bus MCC WHPB, maka terdapat 1 CB yang merasakan adanya gangguan, yakni LVCB WHPB-DOWN untuk zona 1. LVCB WHPB-DOWN merupakan pengaman terakhir sebelum trafo maka LVCB WHPB-DOWN diset tidak mengirim sinyal blocking kepada CB lain. Sedangkan LVCB WHPB-BACKUP karena tidak merasakan gangguan pada daerah pengamanannya di zona 2, maka tidak mengirim sinyal blocking ke pengaman atasnya LVCB WHPB-DOWN. Karena LVCB WHPB-DOWN merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal blocking dari CB lain maka LVCB WHPB-DOWN *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip device* culter-hammer. Berikut kurva TCC *Easy Power* saat gangguan kondisi 3.



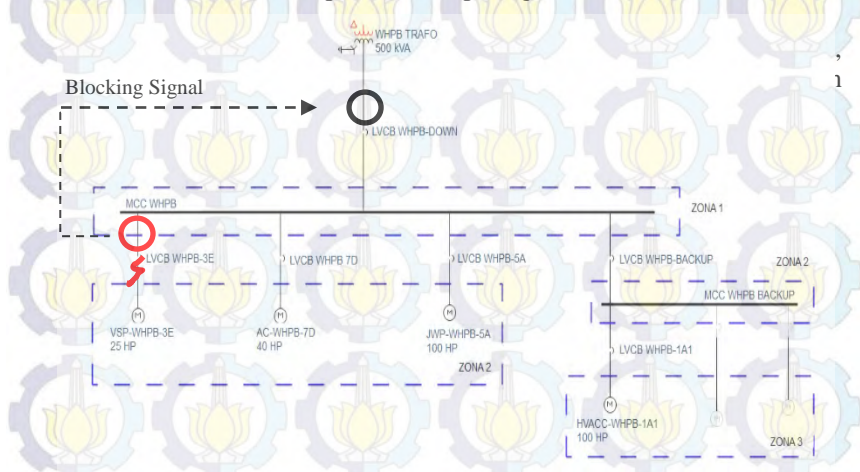


**Gambar 4.21** TCC pada *Easy Power* Saat Gangguan Kondisi 3

LVCB WHPB-DOWN *trip* dengan waktu ZSI dan terjadi perubahan kurva pengaman dari LVCB WHPB-DOWN dimana selisih perubahannya adalah sebesar 0.264 detik dari kurva awalnya sebelum menggunakan ZSI pada gangguan kondisi 3

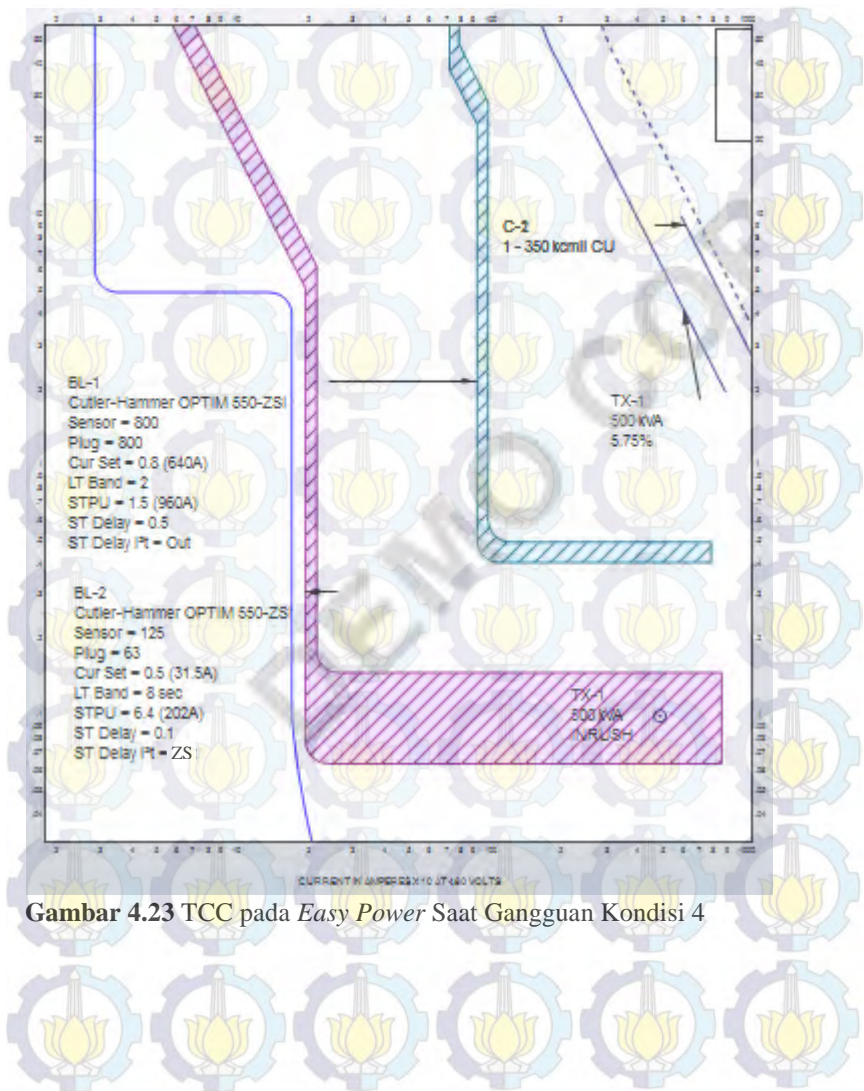
d) Gangguan pada Kondisi 4

Kondisi 4 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor HVACC-WHPB-1A1 seperti terlihat pada gambar 4.16



**Gambar 4.22** Gangguan pada Kondisi 4

Kondisi 4 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 di sisi terminal beban motor VSP WHPB 3E,, maka terdapat 2 CB pada level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan, yakni LVCB WHPB-3E untuk zona 2 dan LVCB WHPB-DOWN untuk zona 1. LVCB WHPB-3E mengirim sinyal blocking kepada LVCB WHPB-DOWN untuk menahan waktu *trip* ZSI LVCB WHPB-DOWN sehingga LVCB WHPB-DOWN menjadi backup LVCB WHPB-3E dengan delay time sebesar 0.5 detik. Karena LVCB WHPB-3E merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal blocking dari CB lain, maka LVCB WHPB-3E *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip* device culter-hammer. Berikut kurva TCC *Easy Power* saat gangguan kondisi 4.

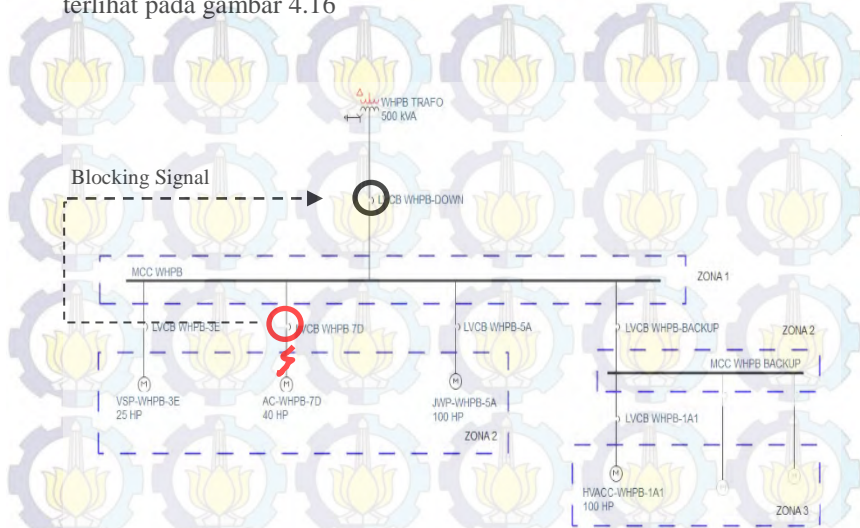


**Gambar 4.23** TCC pada *Easy Power* Saat Gangguan Kondisi 4



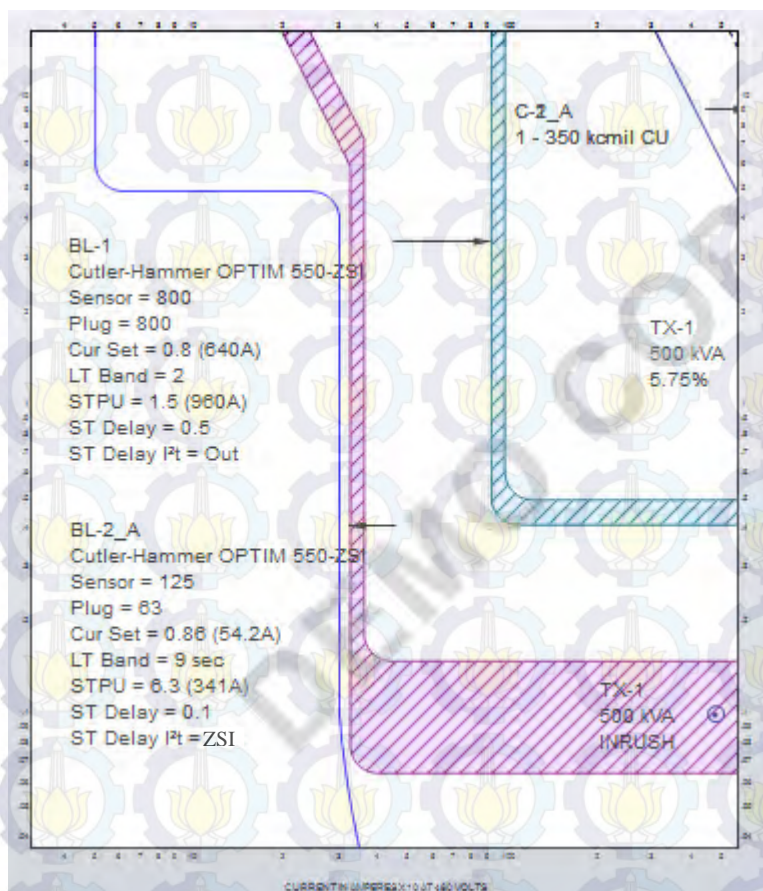
e) Gangguan pada Kondisi 5

Kondisi 5 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor AC-WHPB-7D. Kondisi 5 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 di sisi terminal beban motor AC WHPB 7D., maka terdapat 2 CB pada level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan, yakni LVCB WHPB-7D untuk zona 2 dan LVCB WHPB-DOWN untuk zona 1. Seperti terlihat pada gambar 4.16



**Gambar 4.24** Gangguan pada Kondisi 5

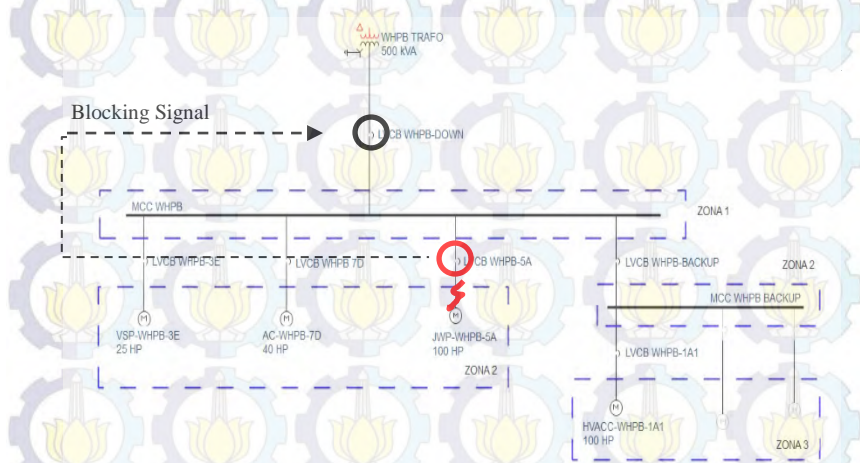
LVCB WHPB-7D mengirim sinyal blocking kepada LVCB WHPB-DOWN untuk menahan waktu *trip* ZSI LVCB WHPB-DOWN sehingga LVCB WHPB-DOWN menjadi backup LVCB WHPB-7D dengan delay time sebesar 0.5 detik. Karena LVCB WHPB-7D merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal blocking dari CB lain, maka LVCB WHPB-7D *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip* device culter-hammer. Berikut kurva TCC Easy Power saat gangguan kondisi 5.



**Gambar 4.25** TCC pada *Easy Power* Saat Gangguan Kondisi 5

f) Gangguan pada Kondisi 6

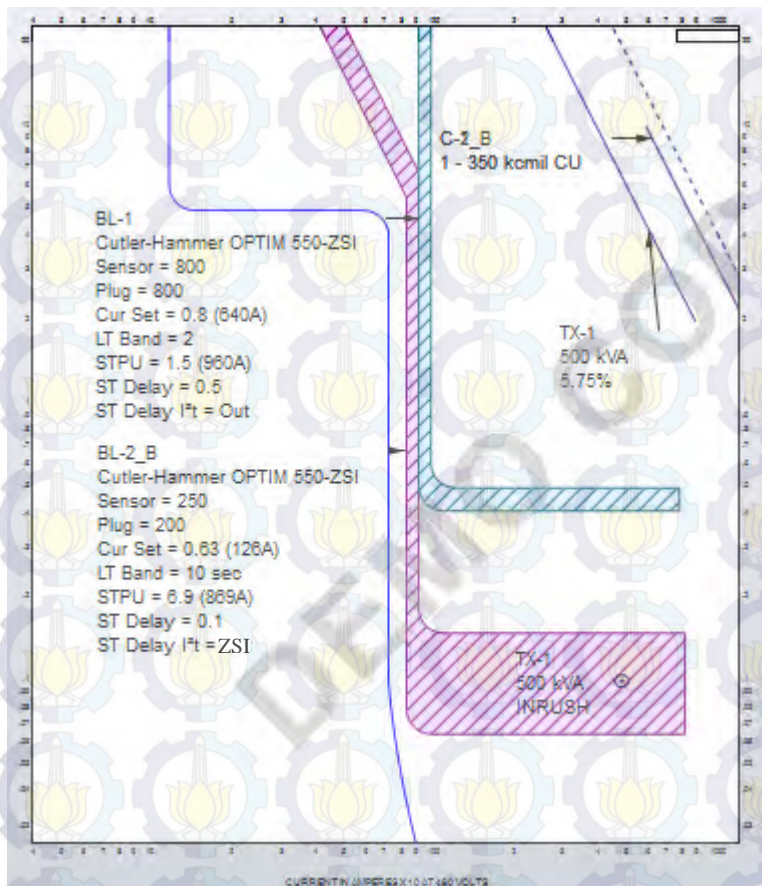
Kondisi 6 adalah saat terjadi gangguan pada sisi beban motor JWP-WHPB-5A seperti terlihat pada gambar 4.16



**Gambar 4.26** Gangguan pada Kondisi 6

Kondisi 6 adalah saat terjadi gangguan pada zona 2 di sisi terminal beban motor JWP WHPB 5A,, maka terdapat 2 CB pada level zona berbeda yang merasakan adanya gangguan, yakni LVCB WHPB-5A untuk zona 2 dan LVCB WHPB-DOWN untuk zona 1. LVCB WHPB-5A mengirim sinyal blocking kepada LVCB WHPB-DOWN untuk menahan waktu *trip* ZSI LVCB WHPB-DOWN sehingga LVCB WHPB-DOWN menjadi backup LVCB WHPB-5A dengan delay time sebesar 0.5 detik. Karena LVCB WHPB-5A merasakan gangguan namun tidak mendapat sinyal blocking dari CB lain, maka LVCB WHPB-3E *trip* dengan waktu ZSI sebesar 0.1 detik untuk *trip* device culter-hammer. Berikut kurva TCC *Easy Power* saat gangguan kondisi 6.





**Gambar 4.27** TCC pada *Easy Power* Saat Gangguan Kondisi 6

Setelah disimulasikan gangguan pada 6 kondisi, terlihat bahwa terjadi perubahan kurva pengaman sesuai dengan lokasi gangguannya dan ZSI dapat mengamankan gangguan dengan cepat dan selektif dimana yang mengamankan gangguan adalah CB terdekat dari lokasi gangguan. Dengan cepatnya mengamankan gangguan maka insiden energi *Arc Flash* yang terjadi bisa berkurang.

Hasil simulasi perhitungan insiden *Arc Flash* tipikal 1 – 4 menggunakan ZSI dapat dilihat pada table 4.7 berikut ini:

**Tabel 4.10** Hasil Simulasi *Arc Flash* Tipikal 1 – 4 Teknik ZSI

| <b>Tipikal 1 – 4</b>               |                 |                |   |                             |                                       |
|------------------------------------|-----------------|----------------|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| <b>ID</b>                          | <b>Type Bus</b> | <b>Ia (kA)</b> | <b>Incident Energi (cal/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Hazard Risk Category</b> | <b>Flash Protection Boundary (ft)</b> |
| Load Terminal Motor VSP-WHPB-3E    | Cable bus       | 1.284          | 0.5   | 0                           | 0.858                                 |
| Load Terminal Motor AC-WHPB-7D     | Cable bus       | 1.331          | 0.5   | 0                           | 0.875                                 |
| Load Terminal Motor JWP-WHPB-5A    | Cable bus       | 1.588          | 0.7   | 0                           | 0.992                                 |
| Load Terminal Motor HVACC-WHPB-1A1 | Cable bus       | 4.596          | 2.1   | 1                           | 2.183                                 |
| Bus MCC-WHPB-BACKUP                | MCC             | 4.788          | 2.1   | 1                           | 2.2                                   |
| Bus MCC-WHPB                       | Switch gear     | 4.634          | 1.4   | 1                           | 2.192                                 |

#### 4.5.2 Perhitungan Manual Insiden Energi *Arc Flash* Setelah Penerapan Teknik ZSI pada Tipikal 1 - 4

Untuk perhitungan perhitungan manual menggunakan Standar IEE 1584-2002 sebagai berikut :

##### ❖ Load Terminal Motor VSP-WHPB-3E

Mencari Ia (Arching Current) :

$$\lg Ia = K + 0,662 \lg .I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V \\ (\lg .I_{bf}) - 0,00304 G (\lg .I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 13 \lg (I_{bf})\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (1.482) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (1.482) - 0.00304 \times 13 \lg (1.482)\}$$

$$= 0.108$$

$$I_a = 1.283 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$En = 10^{K1+K2+1.081 \log(I_a)+0.0011G}$$

$$= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.108+0.0011 \times 13}$$

$$= 0.29$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4.184 \times 1.5 \times 0.29 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right)$$

$$= 2.453 \text{ J/cm}^2 \times 0.24$$

$$= 0.588 \text{ cal/cm}^2$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 0 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$D_B = \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 0.29 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 318.72 \text{ mm} = 0.318 \text{ m}$$

$$= 1.0433 \text{ ft}$$

#### ❖ Load Terminal Motor VSP-WHPB-7D

Mencari  $I_a$  (Arching Current) :

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg .I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V$$

$$(\lg .I_{bf}) - 0.00304 G (\lg .I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 13 \lg (I_{bf})\}$$



$$\begin{aligned}
 &= \{-0.097 + 0.662 \lg (1.548) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\
 &\quad 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (1.548) - 0.00304 \times 13 \lg (1.548)\} \\
 &= 0.125
 \end{aligned}$$

$$I_a = 1.333 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned}
 En &= 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G} \\
 &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.125+0.0011 \times 13} \\
 &= 0.30
 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned}
 E &= 4.184 \times 1.5 \times 0.30 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right) \\
 &= 2.538 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\
 &= 0.609 \text{ cal/cm}^2
 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 0 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned}
 D_B &= \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
 &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 0.3 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= 324.17 \text{ mm} = 0.324 \text{ m} \\
 &= 1.062 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

#### ❖ Load Terminal Motor JWP-WHPB-5A

Mencari  $I_a$  (Arching Current) :

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \\
 (\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf})$$

$$\begin{aligned}
 &= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 \\
 &\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 13 \lg (I_{bf})\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \{-0.097 + 0.662 \lg (1.885) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 \\
 &\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (1.885) - 0.00304 \times 13 \lg (1.885)\}
 \end{aligned}$$

$$= 0.201$$

$$I_a = 1.59 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned} En &= 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.201+0.0011 \times 13} \\ &= 0.366 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 \times 1.5 \times 0.366 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right) \\ &= 3.096 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 0.74 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 0 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 0.366 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= 358.55 \text{ mm} = 0.358 \text{ m} \\ &= 1.175 \text{ ft} \end{aligned}$$

#### ❖ Load Terminal Motor HVACC-WHPB-1A1

Mencari  $I_a$  (Arching Current) :

$$\begin{aligned} \lg I_a &= K+0,662 \lg./bf + 0.0966 V + 0,000526 G + 0.5588 V \\ &\quad (\lg./bf) - 0,00304 G (\lg./bf) \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (Ibf) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 13 \\ &\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (Ibf) - 0.00304 \times 13 \lg (Ibf)\} \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (6.852) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 13 + 0.5588 \times 0.48 \lg (6.852) - 0.00304 \times 13 \lg (6.852)\} \end{aligned}$$

$$= 0.7$$

$$I_a = 5.02 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$En = 10^{K1+K2+1.081 \log(Ia)+0.0011G}$$

$$= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.7+0.0011 \times 13}$$

$$= 1.27$$

$$E = 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E = 4.184 \times 1.5 \times 1.27 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{455^2} \right)$$

$$= 10.74 \text{ J/cm}^2 \times 0.24$$

$$= 2.57 \text{ cal/cm}^2$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 1 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$D_B = \left[ 4.184 C_f En \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 1.27 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^2}{5} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 666.98 \text{ mm} = 0.666 \text{ m}$$

$$= 2.185 \text{ ft}$$

#### ❖ Load Terminal Motor HVACC-WHPB-BACKUP

Mencari  $I_a$  (Arching Current) :

$$\lg I_a = K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V$$

$$(\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf})$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 25 \lg (I_{bf})\}$$

$$= \{-0.097 + 0.662 \lg (6.92) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 25 + 0.5588 \times 0.48 \lg (6.92) - 0.00304 \times 25 \lg (6.92)\}$$

$$= 0.68$$



$$I_a = 4.78 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081 \log(I_a)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.68+0.0011 \times 25} \\ &= 1.24 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 \times 1.5 \times 1.24 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.641}}{455^{1.641}} \right) \\ &= 9.442 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 2.26 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 18 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 1 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 1.24 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.641}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.641}} \\ &= 670.3 \text{ mm} = 0.67 \text{ m} \\ &= 2.198 \text{ ft} \end{aligned}$$

### ❖ Bus MCC-WHPB

Mencari  $I_a$  (Arching Current) :

$$\begin{aligned} \lg I_a &= K + 0.662 \lg I_{bf} + 0.0966 V + 0.000526 G + 0.5588 V \\ &\quad (\lg I_{bf}) - 0.00304 G (\lg I_{bf}) \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (I_{bf}) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times 32 \\ &\quad + 0.5588 \times 0.48 \lg (I_{bf}) - 0.00304 \times 32 \lg (I_{bf})\} \\ &= \{-0.097 + 0.662 \lg (6.92) + 0.0966 \times 0.48 + 0.000526 \times \\ &\quad 32 + 0.5588 \times 0.48 \lg (6.92) - 0.00304 \times 32 \lg (6.92)\} \\ &= 0.666 \end{aligned}$$

$$I_a = 4.634 \text{ kA}$$

Mencari Besar *Incident Energi Arc Flash*:

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1.081 \log(I_a)+0.0011G} \\ &= 10^{-0.555-0.113+1.081 \times 0.666+0.0011 \times 32} \\ &= 1.22 \end{aligned}$$

$$E = 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\begin{aligned} E &= 4.184 \times 1.5 \times 1.22 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.473}}{610^{1.473}} \right) \\ &= 5.74 \text{ J/cm}^2 \times 0.24 \\ &= 1.378 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Jarak kerja : 24 inch

Kategori (NFPA70E 2009) : 1 PPE Cat

Mencari *Flash-protection boundary* :

$$\begin{aligned} D_B &= \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) x \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[ 4.184 \times 1.5 \times 1.22 \times \left( \frac{0.15}{0.2} \right) x \left( \frac{610^{1.473}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{1.473}} \\ &= 670.1 \text{ mm} = 0.67 \text{ m} \\ &= 2.198 \text{ ft} \end{aligned}$$

#### 4.6 Perbandingan Insiden Energi Arc Flash Resetting ZSI

Hasil perbandingan insiden energi Arc Flash antara kondisi *Resetting* dengan menggunakan teknik ZSI dapat dilihat pada table 4.9 dan table 4.11 berikut ini :

| Tipikal 1 - 4                          |   | <i>Resetting</i> | ZSI    |
|--|---|------------------|--------|
| Load Terminal<br>Motor VSP-<br>WHPB-3E | Ia (kA)                                   | 1.284            | 1.284  |
|  | FCT (s)                                   | 0.15             | 0.15   |
|  | Incident Energi<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 0.583            | 0.5    |
|  | Hazard Category                           | 0                | 0      |
|  | Working Distance<br>(ft)                  | 1.045            | 1.0433 |

|   |   |       |       |
|---|---|-------|-------|
| Load Terminal<br>Motor AC-WHPB-<br>7D     | Ia (kA)                                   | 1.333 | 1.331 |
|   | FCT (s)                                   | 0.15  | 0.15  |
|   | Incident Energi<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 0.607 | 0.5   |
|   | Hazard Category                           | 0     | 0     |
|   | Working Distance<br>(ft)                  | 1.066 | 1.062 |
| Load Terminal<br>Motor JWP-<br>WHPB-5A    | Ia (kA)                                   | 1.596 | 1.588 |
|   | FCT (s)                                   | 0.15  | 0.15  |
|   | Incident Energi<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 0.737 | 0.7   |
|   | Hazard Category                           | 0     | 0     |
|   | Working Distance<br>(ft)                  | 1.175 | 1.175 |
| Load Terminal<br>Motor HVACC-<br>WHPB-1A1 | Ia (kA)                                   | 5.031 | 4.596 |
|   | FCT (s)                                   | 0.15  | 0.15  |
|   | Incident Energi<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 2.55  | 2.1   |
|   | Hazard Category                           | 1     | 1     |
|   | Working Distance<br>(ft)                  | 2.186 | 2.183 |
| Bus MCC WHPB-<br>BACKUP                   | Ia (kA)                                   | 4.803 | 4.788 |
|   | FCT (s)                                   | 0.33  | 0.15  |
|   | Incident Energi<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 4.959 | 2.1   |
|   | Hazard Category                           | 2     | 1     |
|   | Working Distance<br>(ft)                  | 3.56  | 2.2   |
| Bus MCC WHPB                              | Ia (kA)                                   | 4.648 | 4.634 |
|   | FCT (s)                                   | 0.51  | 0.15  |
|   | Incident Energi<br>(cal/cm <sup>2</sup> ) | 4.695 | 1.4   |
|   | Hazard Category                           | 2     | 1     |
|   | Working Distance<br>(ft)                  | 5.049 | 2.192 |

**Tabel 4.11** Hasil Perbandingan Arc Flash ZSI dengan *Resetting*



Terlihat dari table 4.11 dengan menggunakan teknik ZSI terjadi pengurangan insiden energi *Arc Flash* sebesar :

1. Bus MCC WHPB-BACKUP sebesar 57.65% dari 4.959 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 2.1 cal/cm<sup>2</sup>
2. Bus MCC WHPB sebesar 70..18% dari 4.695 cal/cm<sup>2</sup> menjadi 1.4 cal/cm<sup>2</sup>

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Dari hasil running simulasi dengan software ETAP 12.6 dapat diketahui bahwa kondisi eksisting koordinasi pengaman kelistrikan WHPB plant Belida masih tidak sesuai standar kondisi pengaman yang benar. Hal ini yang menyebabkan nilai insiden eneginya kecil. Perlu dilakukan *resetting* agar koordinasi pengamannya sesuai standard dan mengetahui nilai insiden energi *Arc Flash*
2. Insiden energi *Arc Flash* saat kondisi *resetting* masih berbahaya sehingga perlu dilakukan pengurangan insiden energi tersebut agar dapat meningkatkan keselamatan bagi pekerja serta tidak merusak peralatan.
3. Dari hasil simulasi dengan software *Easy Power*, dapat diketahui bahwa metode ZSI mampu mengurangi insiden energi *Arc Flash* dengan efektif dan efisien tanpa mengorbankan pengaman yang ada
4. Metode ZSI lebih efektif dan efisien dalam mengamankan dan mengurangi insiden energi *Arc Flash* dibanding dengan penggunaan rele bus differensial yang membutuhkan CT (*Current Transformer*) yang banyak serta ruang yang lebih besar.
5. *Zone Selective Interlocking* mampu mengurangi insiden energi *Arc Flash* yang terjadi. Pengurangan insiden energi ini terjadi pada bus-bus sebagai berikut:
  - a) Bus MCC WHPB-BACKUP sebesar 57.65% dari  $4.959 \text{ cal/cm}^2$  menjadi  $2.1 \text{ cal/cm}^2$   
Bus MCC WHPB sebesar 70..18% dari  $4.695 \text{ cal/cm}^2$  menjadi  $1.4 \text{ cal/cm}^2$

## 5.2 Saran

Dari pengerjaan Tugas Akhir ini diharapkan dilakukan pengembangan untuk beberapa hal sebagai berikut:

1. ZSI merupakan teknik pengurangan insiden energi pada sistem kelistrikan tegangan rendah. Pengembangan selanjutnya ZSI dapat dikombinasikan dengan rele khusus sehingga tidak hanya dapat mengurangi *Arc Flash* pada tegangan rendah namun juga pada tegangan menengah dan tinggi.
2. Penerapan metode pada sistem kelistrikan ring. Karena sistem kelistrikan ring memiliki ke khas-an dalam penyaluran daya dan koordinasinya.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lane, Jhon PE, "Arc Flash Hazard Analysis" Electrical Safety Engineer, AVO Training Institute.
- [2] Vajko, Rob., "The Basic Arc Flash Protection", © National Safety, Inc, 2008.
- [3] IEEE Std. 1584-2002., "IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculation", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc 2002.
- [4] Albert Marroquin, "Evaluating NFPA 70E Arc Flash Hazard Category Tables", Electrical Product & Solutions, September 2007
- [5] Burn Injury facts, "Arc Flash / Blast Hazard Prevention". Report #86 1-2006, April 2006,
- [6] Antony C.Parsons, W. Blane Leuschner, and Kevin X.Jiang., "Simplified Arc Flash Hazard Analysis Using Energy Boundary Curves." IEEE Transections on Industry Applications Vol.44 no.6, November/December 2008.
- [7] SPLN 52-3 : 1983, "Pola Pengaman Sistem Bagian Tiga, Sistem Distribusi 6 kV dan 20 kV", Perusahaan Umum Listrik Negara, Jakarta, Pasal 4, 1983
- [8] Wahyudi, R, "Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
- [9] Donna Lee Hodgson and David Shipp. *Arc-Flash Incident Energy Reduction Using Zone Selective Interlocking*, IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 3, May/June 2010.
- [10] Christopher G. Walker. *Arc-Flash Energy reduction techniques: Zone-Selective Interlocking and Energy-Reducing Maintenance Switching*, IEEE transactions on Industry, Vol. 49, No. 2, March/April 2013.
- [11] Gary H. Fox, PE. *Methods For Limiting Arc Flash Hazards While Maintaining System Selectivity*, IEEE transactions on Industry. 2010
- [12] M. Valdes, R. Narel, P. Hamer, B. Premerlani, and T. Papallo, "Zone based protection for low voltage systems; zone selective interlocking, bus differential and the single processor concept," in Proc. IEEE PCIC, 2007, pp. 1-10.
- [13] Marcelo E. Valdes, John J. Dougherty, "Advances in Protective Device Interlocking for Improved Protection and Selectivity", IEEE transactions on Industry, Vol. 50, No. 3, May/June 2014.



## RIWAYAT PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Fadli Mulia dan biasa dipanggil Fadli. Lahir di Kabupaten Bogor pada tanggal 21 Juni 1991. Penulis mengawali pendidikan Sekolah dasar di SD Negeri Cileungsi 4 di Kab. Bogor selama 6 tahun, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Cileungsi di Kab. Bogor selama 3 tahun, serta menempuh pendidikan di SMA Negeri 1 Cileungsi di Kab. Bogor selama 3 tahun. Setelah lulus dari SMA, Penulis melanjutkan kuliah Program Diploma 3 (D3) jurusan Teknik Elektronika Industri di Politeknik Negeri Jakarta (PNJ) selama 3 tahun dan lulus tahun 2012. Setelah menyelesaikan program Diploma 3, Penulis melanjutkan kuliah Program Sarjana Lintas Jalur (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah Penulis aktif mengikuti seminar dan pelatihan. Jika ada keperluan bisa menghubungi di email [m.fadlimulia@gmail.com](mailto:m.fadlimulia@gmail.com)